Espectrómetro de massa tipo quadrupolo com feixe molecular modulado

N. M. O. SOARES FRANCO
A. M. C. MOUTINHO
Universidade Técnica de Lisboa (I. S. T.)
Centro de Física Molecular das Universidades de Lisboa (I. N. I. C.)

RESUMO

Descreve-se um espectrómetro de massa do tipo quadrupolo focando-se, em particular, a sua montagem e modo de funcionamento. Apresentam-se detalhadamente as características de um filtro de massa e as suas condições de estabilidade.

Este quadrupolo trabalha com um feixe molecular modulado. Esta técnica permite a obtenção de espectros de massa sem contribuição do fundo devido a gases residuais.

ABSTRACT

A quadrupole mass spectrometer, its assembly and functioning are described. The characteristics and stability conditions of a mass filter are studied in detail.

This quadrupole operates with a modulated molecular beam, a technique which allows the obtention of mass spectra without background contribution.

1 — INTRODUÇÃO

Muitas experiências no domínio da Física Atómica e Molecular requerem a utilização de feixes moleculares. No entanto a sua viabilidade depende, em grande parte, da intensidade dos feixes e das possibilidades da sua detecção. No caso de átomos alcalinos ou moléculas contendo esses átomos, atendendo a que são facilmente ionizáveis, é possível utilizar a técnica de ionização em superfícies metálicas sendo a eficiência atingida, nalguns casos, praticamente 100 %. Esta facilidade de detecção permitiu já a realização de numerosas experiências de dispersão utilizando feixes de átomos alcalinos. Quanto a experiências com feixes de átomos e moléculas não alcalinos, muitas não são ainda viáveis pois a eficiência de detecção é normalmente muito baixa. Os detectores deste tipo de feixes baseiam-se geralmente na ionização por bombardeamento dos átomos ou moléculas do feixe com electrões seguindo-se uma separação dos iões de acordo com as suas razões m/e (massa/carga). O sistema de detecção que se irá descrever é deste tipo sendo a separação de massas efectuada por um campo de rádio-frequência aplicado a um filtro tipo quadrupolo **[1]**, **[2]**, **[3]**. Este conjunto constitui um espectrómetro de massa e por isso na sua montagem foi considerada a possibilidade de utilização como detector de feixes moleculares ou analisador de amostras gasosas. No primeiro caso considera-se que este sistema de detecção faz parte de um aparelho destinado a experiências de dispersão com feixes moleculares.

Num espectrómetro de massa convencional a ionização é realizada, por bombardeamento de um gás contido numa pequena câmara com um feixe de electrões. Porém atendendo a que existe um gás residual na câmara também se formam iões dos componentes desse gás. A utilização de um feixe molecular modulado para introduzir a amostra no ionizador permite um tratamento do sinal de saída de modo a obter espectros de massa devidos unicamente a iões da amostra a analisar. O sistema de detecção aqui descrito usa esta técnica e consta de cinco partes fundamentais (Fig. 1).

— Sistema de Vácuo
— Feixe Molecular
— Ionizador
— Filtro de Massa
— Sistema de Medida de Iões

O ionizador, filtro de massa e parte do sistema de medida de iões foram construídos pela Extranuclear Laboratories, Inc. As outras partes foram construídas nos S. A. I. D. — Serviços de Apoio à Investigação e Desenvolvimento e neste Centro com projectos dos autores.

Manuscrito recebido para publicação em 14/6/78.

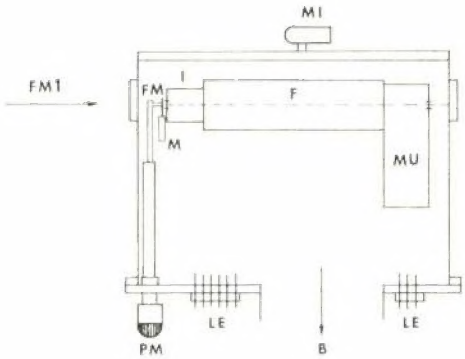


FIG. 1

Espectrómetro de massa; MI — Cabeça de Ionização, FM — Feixe Molecular, FM 1 — Feixe Molecular de uma experiência de atenuação, I — Ionizador, F — Filtro de Massa, MU — Multiplicador, B — Bombeamento, LE — Ligações Eléctricas, M — Sistema Mecânico de Modulação, PM — Parafuso Micrométrico

Em seguida apresenta-se uma descrição dos elementos deste sistema assim como as suas características e modos de funcionamento.

2 — SISTEMA DE VÁCUO

O espectrómetro de massa foi montado numa câmara de alto vácuo como se pode ver na Fig. 1. Nesta câmara o pré-vácuo é obtido a partir de uma bomba rotatória com dois estágios, obtendo-se um vácuo da ordem dos 10^{-3} mbar. Uma bomba de difusão a óleo e uma trapa com azoto líquido permitem atingir um vácuo da ordem dos 10^{-6} mbar. À entrada da câmara a velocidade de bombeamento é estimada em 430 l/s. Para reduzir a pressão parcial de alguns gases facilmente condensáveis existem no interior da câmara duas outras trapas. Utilizando azoto líquido obtém-se então um vácuo da ordem dos 10^{-7} mbar. Com o espectrómetro em funcionamento a pressão na câmara pode subir até 7×10^{-6} mbar. Todas unidades electrónicas do espectrómetro de massa estão protegidas contra eventuais aumentos de pressão na câmara através de uma unidade de controlo de pressão que corta a alimentação.

O espectrómetro foi montado num suporte que permite ajuste na vertical de modo a receber o feixe molecular segundo o seu eixo.

3 — FEIXE MOLECULAR

Neste espectrómetro de massa a introdução do gás a analisar na zona de ionização é feita por um feixe molecular alinhado com o eixo do aparelho. A utilização de um feixe molecular apresenta, como veremos, vantagens em relação ao método convencional de ionização do gás contido numa câmara. O feixe molecular é obtido por efusão do gás a analisar através de um pequeno capilar com 0,2 mm de diâmetro interno ligado a um sistema de introdução de amostras. À saída do capilar o gás tem uma distribuição espacial bastante estreita sendo a parte central seleccionada por uma abertura circular à entrada do ionizador. Nestas condições a colimação é bastante eficiente. Esta fonte pode no entanto, ser desviada do eixo do quadrupolo permitindo assim a detecção de um feixe molecular de uma experiência de dispersão montada antes da câmara do quadrupolo.

Uma importante vantagem da utilização do feixe molecular em relação ao método convencional advém da possibilidade de utilização da modulação. Esta técnica consiste numa interrupção mecânica do feixe a uma frequência normalmente superior à frequência das flutuações devidas ao bombeamento. Com o intuito de modular o feixe utilizou-se um diapasão Bulova ao qual se adaptou uma palheta metálica com 0,5 mm de largura, vibrando à frequência de 360 Hz. Assim, o gás residual entra no ionizador de um modo contínuo enquanto que as partículas do feixe entram de um modo alternado.

4 — IONIZADOR

Para realizar a análise de amostras torna-se necessário proceder à ionização dos seus componentes. Há variadíssimos tipos de fontes de iões. Na fonte de iões deste aparelho a ionização é obtida por bombardeamento do feixe molecular e do gás residual por electrões. Os iões assim obtidos são acelerados e focados segundo o eixo do sistema pela acção de um campo eléctrico criado pelas diferentes lentes que constituem a fonte (Fig. 2).

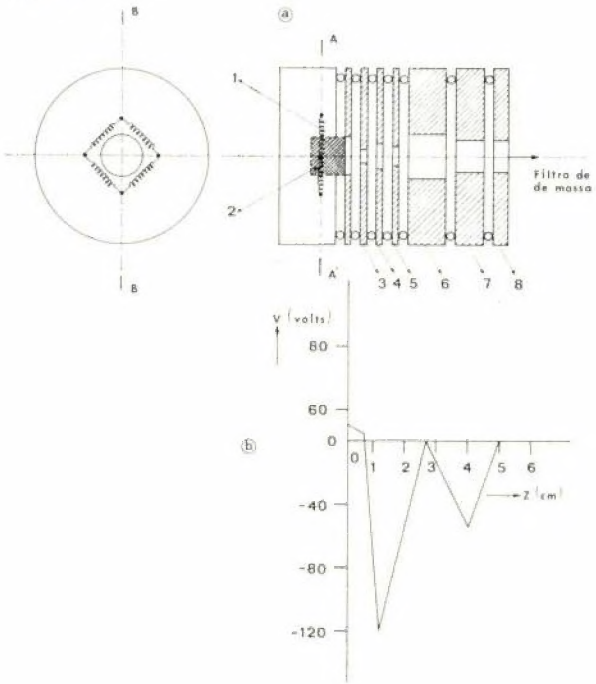


FIG. 2

a — Ionizador; Cortes do ionizador A — A' e B — B'; 1 — Filamento; 2 — Região de ionização; 3 — Extractor; 4 — Lente 1; 5 — Placa colimadora; 6 — Lente 2; 7 — Lente 3; 8 — Colimador; b — Diagrama típico de potenciais aplicado aos vários eléctrodos

Os electrões são obtidos por emissão termoelectrónica de quatro filamentos de tungsténio e acelerados para um cilindro de rede que limita a zona de ionização. A corrente máxima de emissão que se pode obter é de 50 mA se a energia de aceleração dos electrões for de 100 volts.

Os iões formados na região de ionização são posteriormente extraídos e acelerados devido à acção conjunta de um extractor e da lente 1 (vidé Fig. 2) cujo potencial negativo penetra através do orifício do extrator. Ao extrator está normalmente aplicada uma tensão negativa em relação à zona de ionização de modo a evitar que os electrões progridam segundo o eixo da fonte. Os iões devem entrar no filtro orientados tanto quanto possível segundo o seu eixo, pelo que só devem apresentar movimento segundo esse eixo ($x_o = y_o = \dot{x}_o = \dot{y}_o = 0$ e $\dot{z}_o \neq 0$). Com este fim, a fonte possui mais duas lentes para focalização às quais se aplicam, igualmente, tensões negativas de modo a obter um máximo na corrente de iões que entra no filtro. A energia dos iões obtidos por este ionizador fica determinada pela diferença de potencial entre a zona de ionização e o potencial da placa de entrada do filtro que, normalmente, está ligada à massa (Fig. 2).

Condições de trabalho típicas do ionizador, estão indicadas no gráfico da Fig. 2.b.

5 — FILTRO DE MASSA

5.1 — Teoria

Um filtro de massa (Fig. 3) é constituído por quatro eléctrodos de forma hiperbólica, idênticos e simetricamente colocados como se indica na Fig. 3.a. No plano XY o perfil dos eléctrodos será definido pela equação.

$$\pm (x^2 - y^2) = r_o^2 \qquad (1)$$

onde r_o é o raio da circunferência centrada no eixo ZZ' e tangente, simultaneamente, aos quatro eléctrodos **[4]**. Na prática os eléctrodos são em geral construídos com uma forma cilíndrica de raio compreendido entre r_o e $2r_o$. Este facto traduz-se por uma distorção do campo em relação ao ideal o que, em primeira aproximação, se torna desprezável pois só afecta o comportamento de iões com grandes oscilações.

No caso do quadrupolo com que se trabalhou, o filtro de massa é constituído por quatro eléctrodos cilíndricos com 1,9 centímetros de diâmetro e 22 centímetros de comprimento colocados tangencialmente a uma circunferência de raio 0,822 centímetros. Nesse caso o intervalo de massas é de 0-300 u.m.a.

Se a tensão aplicada aos eléctrodos for puramente dc, os iões focados segundo o eixo zz' irão descrever uma trajectória circular centrada nesse eixo e situada num plano normal a ele. Nestas condições não há possibilidade de progressão dos iões através do filtro o que impossibilita a sua detecção. Se a tensão aplicada, além

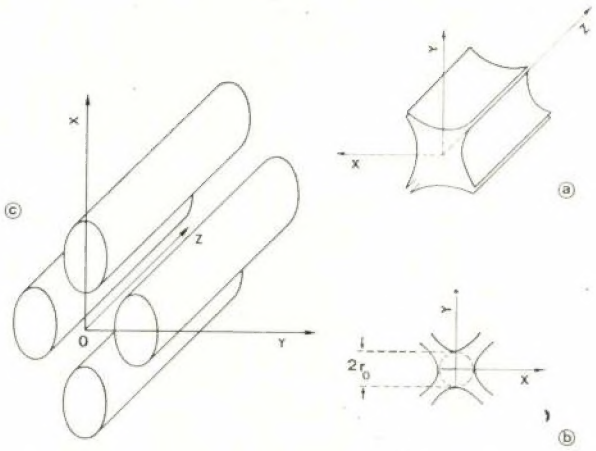


FIG. 3

a) Filtro com pólos hiperbólicos; b) Corte transversal; c) Filtro com pólos cilíndricos

da componente dc, tiver uma componente oscilatória, então os iões, caracterizados pela razão m/e, irão descrever trajectórias ondulatórias progredindo no filtro. Assim, a tensão aplicada aos eléctrodos terá que ser da forma

$$\Phi (t) = U + V \cos \omega t \qquad (2)$$

Esta será, portanto, a tensão a aplicar a dois eléctrodos opostos aplicando-se aos outros dois uma tensão igual mas de sinal contrário. A distribuição de potencial será

$$\Psi (x, y) = (U + V \cos \omega t) \frac{x^2 - y^2}{r_o^2} \qquad (3)$$

$$\Psi (z) = 0$$

que obedece à condição $\nabla^2 \Psi = o$ e às condições fronteiras de que os eléctrodos serão equipotenciais **[1] [2]**.

O movimento das partículas de carga e é descrito por

$$m \ddot{x} + (U + V \cos \omega t)\, 2\, e \frac{x}{r_o^2} = 0 \qquad (4.a)$$

$$m \ddot{y} + (U + V \cos \omega t)\, 2\, e \frac{y}{r_o^2} = 0 \qquad (4.b)$$

$$m \ddot{z} = 0 \qquad (4.c)$$

As equações 4.a e 4.b são exemplos da equação de Mathieu e podem ser escritas da forma

$$\frac{d^2X}{dt^2} + (a - 2q \cos 2\theta)\, X = 0 \qquad (5)$$

onde X corresponde a x ou y, θ corresponde a $\omega t/2$ e a e q são dados por

$$a = \pm \frac{8\ eU}{m\ r_o^2\ \omega^2} \tag{6}$$

$$q = \mp \frac{4\ eV}{m\ r_o^2\ \omega^2} \tag{7}$$

A solução pode ser escrita na forma

$$x = k_1\ e^{i\beta\theta} \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s}\ e^{2is\theta} + $$

$$+ k_2\ e^{-i\beta\theta} \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s}\ e^{-2is\theta} \tag{8}$$

onde k_1 e k_2 são constantes de integração e β é um parâmetro. Se β tomar valores reais as séries serão convergentes e o ião de massa m/e terá uma trajectória estável no campo do quadrupolo podendo portanto ser recebido num colector à saída do filtro. Se β for imaginário as séries serão divergentes e o ião terá uma trajectória instável que corresponde a um aumento exponencial da amplitude acabando por colidir com os eléctrodos.

As soluções correspondentes a valores reais de β constituem as chamadas funções de Mathieu e podem ser de ordem par ou impar conforme o valor desse parâmetro. No caso do quadrupolo as regiões de estabilidade, no plano (a, q) são muito reduzidas porque têm de corresponder a soluções simultaneamente estáveis em x e y **[4]**. **[5]**.

A região que nos interessa é a limitada pelas funções de Mathieu de ordem zero ($\beta = 0$) e de primeira ordem ($\beta = 1$), e podem ser escritas sob a forma de uma série de potências de q.

$$(\beta = 0) \quad a = -\frac{q^2}{2} + \frac{7}{128} q^4 + O\ (q^6) \tag{9.a}$$

$$(\beta = 1) \quad a = 1 - q - \frac{q^2}{8} + \frac{q^3}{64} - \frac{1}{1536} q^4 + O\,(q^5) \tag{9.b}$$

As condições de estabilidade de operação do filtro de massa são determinadas pela posição do seu ponto representativo no diagrama (a, q) (Fig. 4). Se o ponto se encontra dentro da região ABC, as trajectórias dos iões são estáveis em x e y. Este diagrama é normalmente designado por diagrama de estabilidade.

Para uma determinada razão de potenciais, u = U/V, pode-se estabelecer no diagrama de estabilidade uma recta, de equação a = 2qu, cuja porção neste diagrama define a zona de massas que têm trajectórias estáveis. A variação proporcional de U e V mantendo u constante permite que as várias razões m/e passem sucessivamente pela região estável. A variação da razão u implica uma variação da zona estável e portanto da resolução do filtro. Se u = 0, o que corresponde a anular a tensão

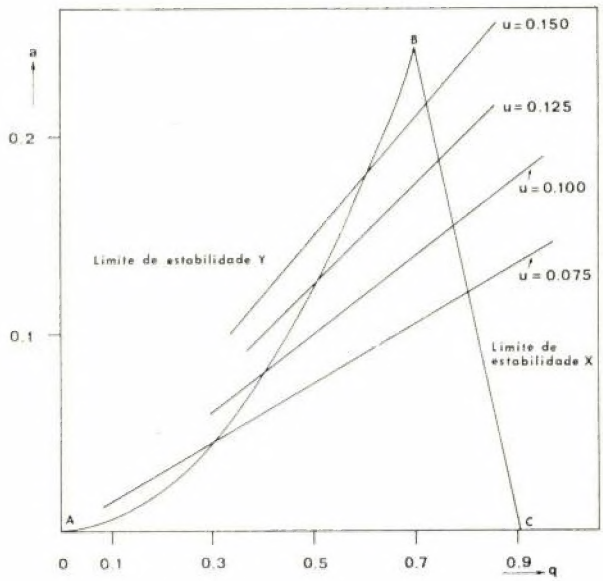


FIG. 4

Diagrama de estabilidade (a,q)

contínua U temos uma recta de operação coincidente com o eixo dos q (vidé Fig. 4). Neste caso é possível obter uma medida da corrente iónica total e portanto a pressão total se V for muito pequeno. Um aumento progressivo de V irá fazer com que a corrente iónica vá diminuindo visto que só atingem o multiplicador os iões com valores de m/e superiores correspondente ao valor de V **[10]**.

Na prática para obter espectros de massa só interessa trabalhar perto do vértice B de coordenadas a = 0,2370 e q = 0,706 pois só nessa zona é possível obter uma resolução satisfatória. Nesta zona do diagrama pode-se utilizar as assimptotas às curvas que estabelecem os limites de estabilidade (Fig. 5).

A amplitude máxima (x_m, y_m) que a trajectória estável de um ião pode ter é uma característica muito importante no estudo do quadrupolo. Este valor é uma função das condições iniciais (x_o, y_o, $\dot{x}_o$, $\dot{y}_o$) de entrada, da desfasagem inicial (ωt_o) do campo rf aplicado e dos valores dos parâmetros a e q no diagrama de estabilidade. Paul e colaboradores calcularam valores para x_m e y_m com valores de β compreendidos entre 0 e 1, que correspondem aos valores de maior interesse para o quadrupolo. Estes autores consideraram dois casos independentes, isto é, calcularam x_m/x_o e y_m/y_o para os parâmetros $\dot{x}_o = \dot{y}_o = 0$, $\beta_x = 0{,}98$; 0,96; 0,92, $\beta_y = 0{,}02$; 0,04; 0,08 e x_m e y_m para os parâmetros $x_o = y_o = 0$, $\dot{x}_o = \dot{y}_o = \omega$ e os mesmos valores de β_x e β_y.

A cada par x_m/x_o, y_m/y_o irão corresponder rectas limites da região de estabilidade como se pode ver na Fig. 5 para os valores 20, 25, 30, 40, 50 e 100. A porção da recta u = a/2q situada entre as duas assimptotas limites corresponde aos iões com 100 % de transmissão enquanto que as restantes partes correspondem a iões parcialmente transmitidos. Se a recta de operação interceptar as duas assimptotas dizemos que estamos a tra-

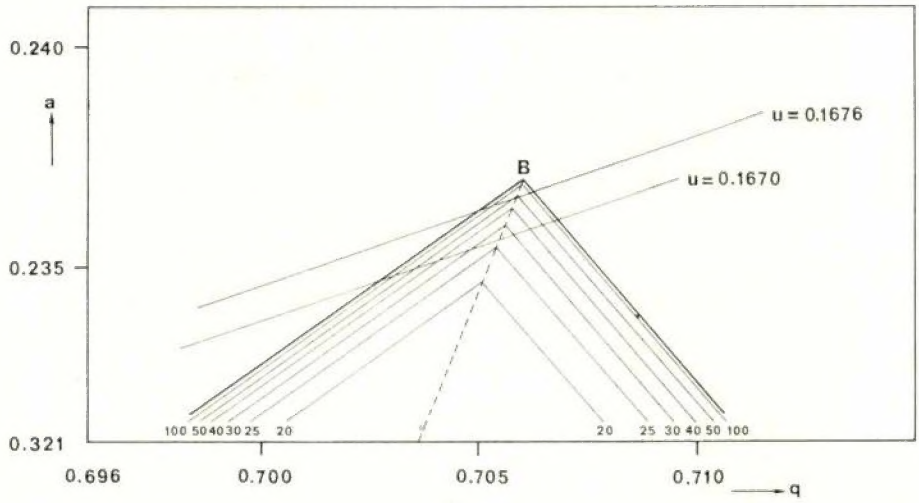


FIG. 5

Detalhes do vértice B do diagrama de estabilidade

balhar na zona trapezoidal. É o que acontece, por exemplo, para o caso $x_m/x_o = y_m/y_o = 30$ e $u = 0{,}1670$.

Um aumento do valor de u irá fazer com que as trajectórias com 100 % de transmissão sejam cada vez menores e pode acontecer que se deixe de estar na zona trapezoidal passando-se para a zona triangular. Este facto pode-se ver quando se passa por exemplo para $u = 0{,}1676$ considerando $x_m/x_o = y_m/y_o = 30$. Paul e Raether **[5, 9]** obtiveram para o poder resolvente as seguintes expressões aproximadas

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{0{,}75}{1 - u/u_{max}} \qquad (10.a)$$

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{1{,}50}{1 - u/u_{max}} \qquad (10.b)$$

respectivamente para a zona trapezoidal e triangular. No caso de uma resolução infinita teremos

$$U = 1{,}212\, m\, f^2\, r_o^2 \text{ volt} \qquad (11.a)$$

$$V = 7{,}219\, m\, f^2\, r_o^2 \text{ volt} \qquad (11.b)$$

onde f representa a frequência da rádio frequência em MHz e r_o o raio da circunferência tangente aos eléctrodos em centímetro.

Cálculos realizados pelos mesmos autores conduziram às equações

$$(1 - \beta_x)^2 = (0{,}23699 - a) \,/\, 1{,}9375 \qquad (12.a)$$
$$\beta_y^2 = (0{,}23699 - a) \,/\, 0{,}79375 \qquad (12.b)$$

para o parâmetro β e à equação empírica

$$D \simeq r_o\, (\Delta m/m)^{1/2} \qquad (13)$$

onde D representa o diâmetro óptimo de entrada dos iões no filtro. Como a amplitude máxima será r_o quando $D = 2x_o$ ter-se-á

$$\frac{x_m}{x_o} = 2 \left(\frac{m}{\Delta m} \right)^{1/2} \qquad (14)$$

Conjugando esta equação com a equação 10 e 12 obtém-se a coordenada do ponto (a, 0,706) que permite traçar a assimptota para um dado valor x_m/x_o **[9]**.

5.2 — Funcionamento do filtro de massa

A alimentação do filtro de massa é realizada por três unidades: a fonte de alimentação da tensão rf, a unidade de controlo e a cabeça. A cabeça é o indutor de um circuito ressonante em que a capacidade é constituída pelos cabos que a ligam ao filtro e pelos eléctrodos ($C_{ef} = 92$ pF). Este circuito (cabeça) recebe a tensão rf e irá elevá-la até um certo valor imposto pela unidade de controlo. Por outro lado, a cabeça, que opera para uma determinada frequência (1,25 MHz) irá rectificar parte da tensão rf de modo a obter-se a tensão contínua U desejada para que a resolução seja constante.

Das equações 11.a e 11.b podemos concluir que a transmissão de um ião de massa diferente daquela para a qual o sistema foi ajustado só é possível se se alterarem os valores de U e V (simultaneamente) ou o valor de f. Neste espectrómetro de massa uma alteração de f é impossível porque a unidade que cria a tensão rf foi concebida para que o sistema funcione com frequência constante, pelo que é necessário proceder-se a um ajuste entre U e V, para essa frequência, antes de se iniciar o trabalho com o aparelho. A alteração de U e V de modo a que se realize um varrimento automático de todos os iões, para um intervalo pré-estabelecido, é feita fornecendo-se um potencial em rampa à unidade de controlo

(Fig. 6). O facto da razão m/e ser proporcional à amplitude de U e V (eq. 6 e 7) faz com que a escala de massas seja linear, vantagem que é muito importante para a determinação dos valores das massas a partir da identificação de uma delas.

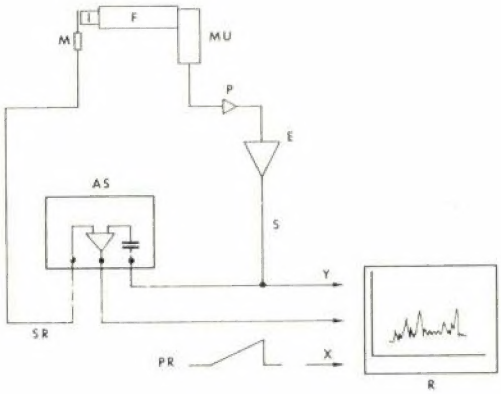


FIG. 6

Sistema de medida de iões. I — Ionizador, F — Filtro de massa, M — Modulador, MU — Multiplicador, P — Pré-amplificador, E — Electrómetro, S — Sinal dc + ac, R — Registador XY, PR — Potencial de rampa, AS — Amplificador sintonizado, SR — Sinal de referência

6 — SISTEMA DE MEDIDA DE IÕES

Para aumentar a sensibilidade e a rapidez de resposta na detecção dos iões, utiliza-se um multiplicador de electrões à saída do filtro de massa. Os iões que seguiram uma trajectória estável e saiem pela abertura do filtro chocam com o primeiro dínodo do multiplicador dando origem a electrões secundários que depois desencadeiam novas emissões produzindo assim uma multiplicação **[1], [6], [7], [8]**. O multiplicador usado neste espectrómetro é da marca Fairchild sendo do tipo linear e construído com 14 dínodos de Cu-Be. Este multiplicador permite um ganho de 10^5 quando se aplica uma diferença de potencial de 3 KV.

Para evitar um aumento da razão sinal/ruído introduziu-se um pré-amplificador junto do multiplicador seguindo-se depois um electrómetro (Fig. 6). Os espectros são obtidos com um registador XY ligado à saída do electrómetro e ao potencial de rampa que controla o varrimento. Como se trabalha com um feixe modulado, analisa-se o sinal do electrómetro com um amplificador sintonizado (lock-in). Neste caso o sinal obtido após a ionização por bombardeamento de electrões tem duas componentes, uma contínua e outra modulada, sendo possível fazer a sua discriminação e amplificar somente a modulada. O espectro então obtido contém somente os picos devidos aos componentes da amostra pois o sinal referente ao fundo não é modulado e portanto não é amplificado. O esquema da electrónica usada na detecção está indicado na Fig 6.

Usando um feixe de cripton modulado obtiveram-se os varrimentos cujos espectros se apresentam na Fig. 7. O espectro a) corresponde a um espectro normal em que há uma sobreposição do gás residual ao do feixe enquanto que b) traduz a análise do feixe por utilização do amplificador sintonizado. Verifica-se que no segundo caso os picos dos grupos dos óleos e outros gases residuais desaparecem completamente. Para obter um espectro deste tipo é necessário fazer uma análise do sinal modulado (lock-in) e integrar os resultados. Como consequência o tempo necessário para obter um espectro é substancialmente maior do que o do caso a).

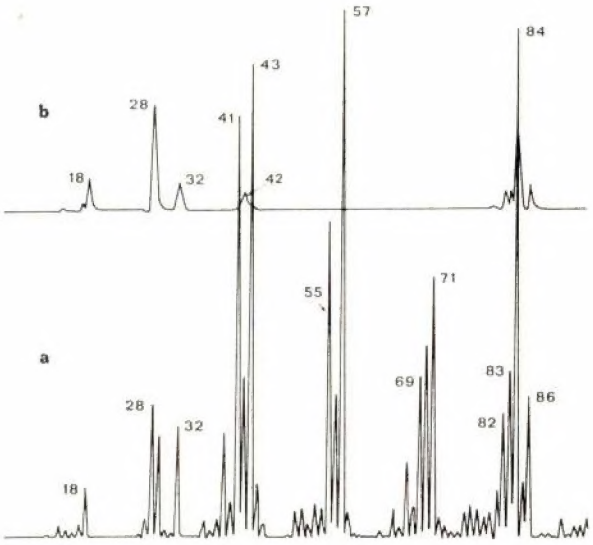


FIG. 7

Espectro obtido por varrimento até à massa 90 u.m.a. utilizando um feixe molecular de uma amostra de cripton; a — sem modulação, b — com modulação

7 — CONCLUSÕES

Um espectrómetro de massa deste tipo tem vantagens em relação ao espectrómetro convencional. Permite obter espectros, numa escala linear, de modo bastante rápido. A selecção de massa é realizada apenas por campos eléctricos enquanto que no espectrómetro convencional além de um campo eléctrico é necessário um campo magnético. Este facto leva à possibilidade de construção de um sistema de dimensões muito menores e por conseguinte de transporte fácil.

A montagem do quadrupolo aqui descrita tem a possibilidade de utilização de feixes moleculares modulados o que permite obter espectros devidos unicamente à amostra a analisar. Esta é uma importante vantagem em relação à espectrometria de massa convencional, pois não se tem de tomar em consideração o fundo do aparelho devido a gases residuais. No entanto o tempo necessário para varrer um determinado intervalo de massa aumenta consideravelmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as discussões com a Dr.ª M.ª Áurea Cunha, a colaboradora técnica do Eng.º Técnico J. M. C. Lourenço e o trabalho realizado nos S. A. I. D. do Complexo I.

Esta investigação faz parte da linha de acção: Interacções atómicas e moleculares — feixes moleculares e foi subsidiada pelo I. N. I. C. (Instituto Nacional de Investigação Científica).

REFERÊNCIAS

[1] **H. Pauly** e **J. P. Toennies**, Adv. in Atom. and Mol. Phys. *1* (1965).

[2] EXTRANUCLEAR LABORATORIES, PITTSBURG, INSTRUMENTATION *1* (1975).

[3] **H. G. Bennewitz** e **R. Wedemeyer**, Zeitschrift fur Physik *172* (1963) 1.

[4] **V. W. Hughes** e **M. L. Schultz**, Methods of Exp. Phys. *4A* (1967) 366.

[5] **W. Paul** e **H. Steinwedel**, Z. Naturforsch *8a* (1953) 448; **W. Paul** e **M. Raether**, Z. Physik *140* (1955) 262; **W. Paul** e **H. P. Reinhard**, **U. Van Zann**, **Z. Physik** *152* (1958) 143.

[6] **V. W. Hughes** e **M. L. Schuttz**, Methods of Exp. Phys. *4A* (1967) 348.

[7] **J. R. Refher**, **G. D. Feesch** e **H. J. Svic**, Int. Jour. of Mass Spect. and Ion Phys. *19* (1976) 351.

[8] **E. J. Sternglass**. Phys. Rev. *108* (1957) 1.

[9] **R. Nagarajan** e **P. K. Shosh**, Int. Jour. of Mass Spect. and Ion Phys. *12* (1973) 79.

[10] **C. Brunnée**, Mass Spectrometry, (1965) pág. 48, Edição R. I. Reed (Glasgow).

Já pensou...

...que o seu anúncio
é muito eficaz se for
publicado na revista que
os seus clientes lêem?
Os milhares de exemplares
de cada número da nossa revista
são lidos por engenheiros
e técnicos, por pessoas ligadas
à indústria, à investigação, ao
ensino, pelos seus clientes,
em suma. Consulte-nos

técnica

REVISTA DE
ENGENHARIA Avenida Rovisco Pais — 1000 Lisboa — Telef. **88 93 23**

NOTICIÁRIO

(Continuação da pág. 316)

POLÍTICA ENERGÉTICA E OPÇÕES NACIONAIS

Sidónio F. B. Paes * afirma que a crise do petróleo não se limita à escalada de preços

O ano de 1980 aparece como singularmente importante no domínio da energia em Portugal.

Antes de mais porque os preços do petróleo subiram a um nível que em muitas e sábias previsões era anunciado para cinco anos depois. Mas a crise do petróleo não se limita à escalada de preços. Na sua base está a vontade dos países produtores e exportadores limitarem a produção, para não delapidarem a riqueza de ouro negro que tão necessária é para o seu futuro desenvolvimento. E assim, às preocupações de preço, acrescem as da segurança do abastecimento.

Esta aceleração para muitos imprevista da revolução energética em que estamos desde 1973 obriga a acelerar também a implementação das políticas capazes de construirem o sistema energético do futuro, baseado noutras fontes que não a petrolífera.

É assim, que, durante o ano corrente, se desenvolvem entre nós, no âmbito da Direcção-Geral de Energia, trabalhos decisivos para a definição dessas políticas e do planeamento energético a longo prazo em que se apoiem.

Em resumo, trata-se da elaboração de modelos energéticos, em cooperação com a Comunidade Económica Europeia, a adaptação do modelo criado pela Empresa Geral de Fomento para estudo dos solos, à análise das alternativas energéticas (energia solar, directa e biomassa) e a análise energética a longa prazo (horizonte 2010) em colaboração com o Governo dos Estados Unidos. Também se incrementaram os estudos de projectos demonstrativos de valorização de diversas formas de energias renováveis; se preparam os meios para desenvolver a informação dos técnicos, dos utilizadores e do público em geral, com vista a motivar a sua indispensável cooperação; se estudam sistemas mais completos de incentivos para o lançamento de novas tecnologias e de mais amplas medidas de economias de energia.

Por tudo isto o debate deste tema no Congresso 80 da Ordem dos Engenheiros reveste grande oportunidade e permitirá a recolha de contributos valiosos para os trabalhos em curso.

São três os pólos desse debate:

Primeiro, as relações entre a energia e o desenvolvimento sócio-económico. Importa não glosar tanto a importância da energia na actividade económica e na vida social que, por evidente, basta que fique como pano de fundo; mas antes analisar como é possvel conseguir o desenvolvimento e a qualidade da vida sem desperdiçar energia, utilizando-a racional e eficientemente, como bem que tende a tornar-se escasso e caro.

Entre nós a tradicional política de subsídio a certos produtos de petróleo, em especial o fuelóleo, tem contribuído para o seu desperdício e para distorcer as decisões de investimento em que tenha incidência.

Mas além de uma política de preços transparente, na linha da última actualização, a conservação de energia em todos os múltiplos sectores de actividade é uma tarefa que só é bem sucedida se profundamente descentralizada e assumida pelo conjunto dos utilizadores.

Outro pólo importantíssimo é a identificação e valorização dos recursos energéticos nacionais. Como se sabe somos pobres em combustíveis fósseis, à excepção do urânio, mas ricos em energias renováveis. Destas apenas a hidroeléctrica tem sido aproveitada, sobretudo desde de 1 945, após a lei 2002. Quanto aos outros — o Sol, o vento, a biomassa, as ondas do mar, a geotermia e a energia térmica do oceano — dispomos de abundante potencial bruto. Mas a grande maioria das possíveis aplicações ainda não se mostram competitíveis, em particular devido aos elevados investimentos necessários. Resumidamente, torna-se indispensável proceder a trabalhos de recolha de informações de base para um inventário rigoroso à criação de incentivos que promovam as aplicações já rentáveis; à dinamização da investigação, desenvolvimento e demonstração de tecnologias que permitam a viabilização de novas aplicações, com elevada participação nacional. Trata-se de uma enorme tarefa que carece de homens e de meios financeiros para se realizar.

O último pólo respeita à caracterização e análise das estratégias de fontes de energia capazes de satisfazer os consumos energéticos crescentes, nas melhores condições de segurança de abastecimento e preço e com aceitável impacto no ambiente.

Embora a longo prazo se possa esperar um crescente contributo das energias renováveis, até ao fim do século as estratégias viáveis no nosso caso terão provavelmente de basear-se ainda nos combustíveis fósseis: o petróleo (embora com participação decrescente), o gás natural, o urânio e sobretudo o carvão.

Todo o problema está, porém, em determinar qual a parte que cabe a cada e como será possível ir maximizando o contributo dos recursos nacionais, sem com isso encarecer a energia mais que o indispensável.

---

* Director-Geral de Energia.

(Informação do «Expresso», 15-3-1980)

Propagation and radiation characteristics of a loose braid coaxial cable over a perfectly conductive ground plane

A. S. CARVALHO FERNANDES
Universidade Técnica de Lisboa (I. S. T.)
Centro de Electrodinâmica (I. N. I. C.)

RESUMO

Apresenta-se o estudo das condições de propagação ao longo dum cabo coaxial de malha larga a uma altura d dum plano infinito condutor perfeito. Dois modos se podem propagar: um modo coaxial (onda lenta), semelhante ao que existe em espaço livre e um modo bifilar (onda rápida) suportado na parte exterior da malha e no plano condutor (imagem do cabo). Apresenta-se o estudo da influência das características da malha e da distância sobre o plano. Apresentam-se também curvas teóricas para a percentagem da energia do modo coaxial que se propaga no exterior e para a atenuação radial da de densidade de potência para ambos os modos.

ABSTRACT

A loose braid coaxial cable (leaky cable) is studied when considered at a height d above a perfectly conductive ground plane. Two modes can propagate: a coaxial mode (slow wave), similar to the one that exists in free space, and a «twin wire» mode (fast wave) supported by the outer part of the braid and the ground (cable's image). The influence of the braid characteristics and the distance above ground is studied; theoretical curves for the percentage of the coaxial mode power that travels outside the coaxial structure and the radial decay of the outside density of power, for both modes, are also presented.

1 — INTRODUCTION

A study of the propagation characteristics of a loose braid cable (leaky cable) in free space has been made elsewhere **[1]**. We will here consider this type of leaky cable at a distance **d** above a perfectly conductive ground plane, which is a model that represents an approximation to the reality. The soil characteristics and specially the frequency, dictate the goodness of that approximation; if we consider a typical wet soil with a conductivity $\sigma \simeq 10^{-1}$ S m^{-1} and $\varepsilon_r \simeq 30$, it can be taken as a conductor up to about 60 MHz and a dielectric for higher frequencies. R. J. Mayhan and R. E. Bailey **[2]**, in a study on dry concrete roadways, present an average number of $\varepsilon_r \simeq 6$ and $\sigma \simeq 10^{-4}$ S m^{-1} which puts the boundary at about 300 kHz. Here only a perfectly conductive ground plane will be considered as it eases significantly the formulation of the problem and still has obvious application.

The introduction of the ground destroys the circular symmetry of the structure; cylindrical coordinates with the origin at the centre of the inner conductor and at a distance **d** from the ground will be used (Fig. 1).

Following the study of the loose braid leaky cable in free space **[1]** it can be expected that the slow wave mode (coaxial mode) will still propagate, the influence of the ground being dependent on the distance **d** and the mesh chracteristics; for a very loose braid (L_{ST} large) the percentage of wave power that travels outside the coaxial structure is large and so the presence of the ground will be more important.

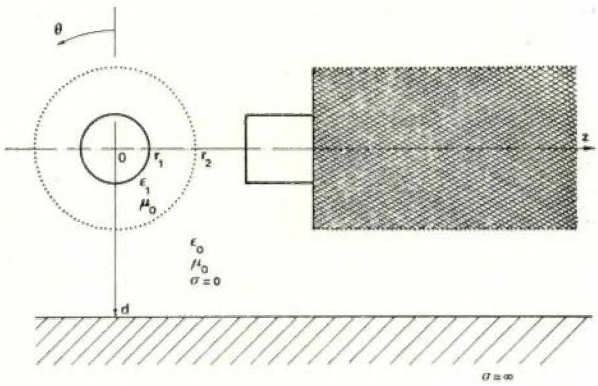


FIG. 1

Schematic diagram of the loose braid coaxial cable over a perfectly conductive ground plane

Manuscrito recebido para publicação em 20/3/79.

However, there now exists the possibility of the presence of a new mode supported by the outer part of the braid and the conductive plane.

The boundaries for the travelling waves are now $r=r_1$, $r=r_2$, $r=\infty$ (for $\theta < \pi/2$) and the plane surface (for $\theta > \pi/2$) Fig. 1. On the perfectly conductive surface there will be the normal component of the electric field E_r and the tangential component of the magnetic field H_θ and a current will flow; this current and the one on the outer braid might support a mode equivalent to a twin wire mode if we substitute the conductive ground by the cable's electrical image.

2 — THEORY

The analysis will be made taking solutions of the wave equation both in medium 1 ($r_1 < r < r_2$) and outside ($r > r_2$) and matching the surface impedances on both sides of the braid using the transfer impedance concept. In the medium 1 we will not consider the influence of the cable image and the solution of the wave equation will be the same as in the free space situation **[1]**. Outside, the solution of the wave equation will be taken for the two cables as if they were independent and then the fields will be superimposed at every point in space.

All the assumptions made **[1]** will be applied in this case and, as before, the series impedances and the surface transfer impedance concept will be used.

In order to be consistent with the method described, the following assumptions must be added:

- The distance between the line and its image (2d) must be large compared with the cable's diameter. Which implies:
- The field associated with the cable's image is essentially constant in the vicinity of the cable.

This method has been applied successfully by Meyerhoff **[3]** on the study of the coupling between two surface wave guides.

The dependence with the axial direction and with the time ($e^{-j\beta z}\, e^{j\omega t}$) will be assumed in all the fields' expressions. The infinite conductivity of the conductors does not alow any electromagnetic fields for $r < r_1$. Within the dielctric medium 1 ($r_1 < r < r_2$) we will use the solution of the wave equation.

$$E_z = A \left[J_o(h_1 r) + b\, Y_o(h_1 r) \right] \tag{1}$$

$$E_r = jA \frac{\beta}{h_1} \left[J_1(h_1 r) + b\, Y_1(h_1 r) \right] \tag{2}$$

$$H_\theta = jA \frac{k_1^2}{\omega\mu_o h_1} \left[J_1(h_1 r) + b\, Y_1(h_1 r) \right] \tag{3}$$

Outside the braid, for $r > r_2$, the first kind Hankel Function will be used for the slow wave and the second kind Hankel Function for the expected fast wave.

$$E_z = A_o\, H_o^{(1)}\, (jh_o r) \tag{4}$$

$$E_r = A_o \frac{\beta}{h_o} H_1^{(1)}\, (jh_o r) \tag{5}$$

$$H_\theta = A_o \frac{k_o^2}{\omega\mu_o h_o} H_1^{(1)}\, (jh_o r) \tag{6}$$

and

$$E_z = A_o\, H_o^{(2)}\, (h_o r) \tag{7}$$

$$E_r = jA_o \frac{\beta}{h_o} H_1^{(2)}\, (h_o r) \tag{8}$$

$$H_\theta = -j\, A_o \frac{k_o^2}{\omega\mu_o h_o} H_1^{(2)}\, (h_o r) \tag{9}$$

For the slow wave, $k_o < \beta < k_1$, β is real such that h_o is also real $[h_o^2 = \beta^2 - k_o^2]$; for large arguments $H_1^{(1)}\, (jh_o r)$ decays with $\exp\, [-h_o r]$ and so, in the radial direction, there is only attenuation and no radiation. For the fast wave $\beta < k_o$, such that h_o is purely imaginary.

For large arguments, $H_1^{(2)}\, (h_o r)$ decays with $\exp\, [-jh_o r]$ such that h_o accounts for the propagation in the radial direction (radiation).

Applying the boundary conditions we will arrive at the characteristic equation.

b can be calculated from the boundary condition at $r=r_1$; at $r=r_2$, E_z should be continuous across the braid, which relates A and A_o for the two expected modes.

Using the series impedances, on the outer side of the braid, for the slow wave

$$Z_S + = \left[\frac{E_z + E_{zi}}{H_\theta + H_{\theta^i}} \right]_{r=r_2} + = \frac{H_o^{(1)}\, (jh_o r_2) - H_o^{(1)}\, (jh_o 2d)}{H_1^{(1)}\, (jh_o r_2) + H_1^{(1)}\, (jh_o 2d)} \frac{\omega\mu_o h_o}{k_o^2} \tag{10}$$

and, for the fast wave

$$Z_S + = \frac{H_o^{(2)}\, (h_o r_2) - H_o^{(2)}\, (h_o 2d)}{H_1^{(2)}\, (h_o r_2) + H_1^{(2)}\, (h_o 2d)} \frac{\omega\mu_o h_o}{-jk_o^2}$$

On the inner side of the braid, it is

$$Z_{S-} = \left[\frac{E_z}{H_\theta} \right]_{r=r_2-} = j\, Z_1 \frac{h_1^2}{k_1} r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{11}$$

with $Z_1 = \dfrac{Z_o}{\sqrt{\varepsilon_r}}$

Using the surface transfer impedance concept

$$Z_{ST} = \left[\frac{E_z}{H_{\theta+} - H_{\theta-}} \right]_{r=r_2} \text{ or, in another form,}$$

$$\frac{1}{Z_{ST}} = \frac{1}{Z_{S+}} - \frac{1}{Z_{S-}} \quad ,$$

we arrive at the charac^t^eristic equation, which is the same for both modes. Using the small arguments approximation for all the functions, and making $Z_{ST} = -j\omega L_{ST}$ and $a = \beta/k_o$,

$$\frac{r_2}{\omega^2 \varepsilon_o L_{ST}} - \frac{\varepsilon_r}{k_o^2 (\varepsilon_r - a^2) \ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{r_2 + 2d}{2d\, k_o^2 (1 - a^2) \ln \frac{r_2}{2d}} = 0 \tag{12}$$

or, in terms of a polynominal in **a**,

$$G_1 a^4 + G_4 a^2 + G_5 = 0$$

with $G_1 = \dfrac{r_2}{\omega^2 \varepsilon_o L_{ST}}$

$$G_2 = \frac{\varepsilon_r}{k_o^2 \ln (r_2/r_1)}$$

$$G_3 = \frac{r_2 + 2d}{2d\, k_o^2 \ln (r_2/2d)}$$

$$G_4 = G_2 - G_1 (\varepsilon_r + 1) - G_3$$

$$G_5 = \varepsilon_r (G_1 + G_3) - G_2,$$

an equation that has two positive solutions, which correspond to two modes.

Equation (12) admits simplifications if we consider the two solutions separately. For cables with air or foam dielectrics ($\varepsilon_r < 1.3$), the solution for the propagation constant of the coaxial mode (slow wave) can be written to a good approximation,

$$\beta_{s.\omega.} = k_1 \left[1 - \frac{L_{ST}}{\mu_o r_2 \ln r_2/r_1} \left(1 - \frac{\ln r_2/r_1}{\varepsilon_r \ln r_2/2d} \right) \right]^{1/2} \tag{13}$$

For the twin wire mode solution (fast wave, $\beta < k_o$), let us make $a \approx 1$ in the second term of equation (12). The simplified formula for this mode becomes

$$\beta_{f.\omega.} = k_o \left[1 - \frac{L_{ST}}{L_{ST} \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1} - \mu_o r_2 \ln r_2/r_1} \; \frac{r_2 + 2d}{2d} \; \frac{\ln r_2/r_1}{\ln r_2/2d} \right]^{1/2} \tag{14}$$

An accurate solution from equation (12) is only possible when $h_o\, 2d < 0.1$ which means for example, at 100 MHz, $d < 0.05$ m; this distance is about the limit imposed by the assumption that 2d should be larger than $2r_2$, on which the theory was built. For good accuracy the following equation must be used:

$$\frac{1}{\omega^2 \varepsilon_o L_{ST}} - \frac{\varepsilon_r}{h_1^2 r_2 \ln r_2/r_1} - j \frac{K_1 (jh_o r_2) + K_1 (jh_o 2d)}{h_o [-K_o (jh_o r_2) + K_o (jh_o 2d)]} = 0 \tag{15}$$

This is the same equation as (12) but the Hankel functions have been substituted by the third kind Bessel Function.

3 — APPLICATION OF THE THEORY

3.1 — Propagation constant of the modes

Using the dimensions of the commercial cable BICC RPC5097C,

$r_1 = 0.00115$ m

$r_2 = 0.005$ m

$\varepsilon_r = 1.3$

and for $f = 100$ MHz, the results showd in fig. 2, were calculated.

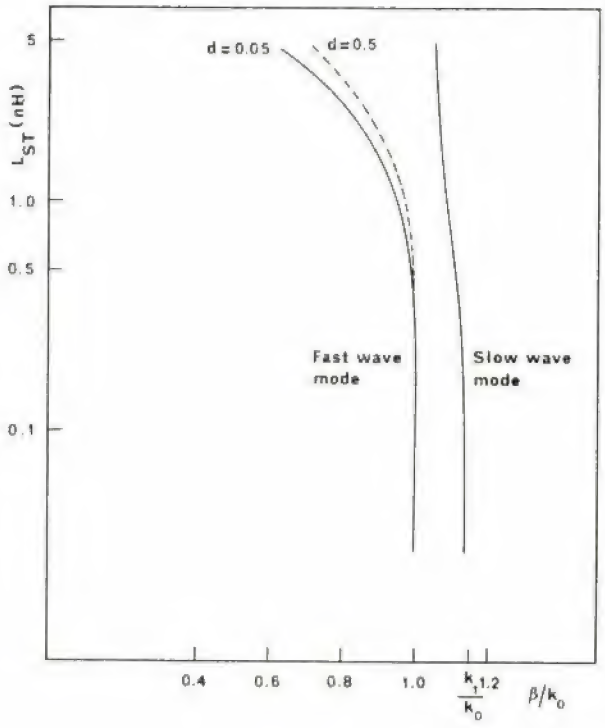


FIG. 2

Dependence of propagation constant with surface transfer inductance, for two values of the distance above the ground. f = 100 MHz

It can be seen that a lower electromagnetic coverage (higher L_{ST}) affects the values of the propagation constants, this effect being more important for large values of the distance above the ground.

The results of the fast wave propagation constant show a value that, except for large values of L_{ST}, is very near k_o; this implies that the outer transverse number h_o is very small and so the angle of radiation is also very small. In other words this wave radiates approximately in the axial direction such that the planes of constant phase are approximately the same as those of the slow wave, which are perpendicular to the cable.

As we have two waves propagating in about the same direction and with different velocities they will beat producing the so called 'standing waves'. Haining **[4]**, in a study of a mode of a braided cable over a perfectly conductive ground, measured the wavelength of the 'standing waves' produced by this beating. He used a cable with 90 % optical coverage and an outer radius of 0.75 mm which must lead to a very small value for the surface transfer inductance; the inside dielectric was solid PTFE ($\varepsilon_r \simeq 2.26$). With a low value of L_{ST} and a large ε_r the fast wave propagation constant must be, according to fig. 2, very near k_o. As for the slow wave, and again in accordance with the same figure, the propagation constant must be very near k_1. Measuring the signal with a probe sliding on the braid, Haining got a very good agreement for the wavelength of the 'standing waves' assuming they had propagation constants of k_o and k_1. This is taken as an experimental support for the theory of these two modes.

3.2 — Percentage of Power that Travels Outside the Coaxial Structure

In order to relate the field values with the input power fed into the cable at any point in space, the fields' coefficients A and A_o must be normalized (expressions (1) to (9)). The driving power of 1 Watt will be assumed. However, one point must be discussed first: the distribution of power between the two modes.

The two propagation modes, resulting from the proposed theoretical analysis, represent two possible ways for a wave to propagate along the braided cable and the conductive plane. What has been learned so far, was that this structure allows such modes to propagate, but their existence depends on whether or not the proper initial conditions exist. The two modes should be able to propagate independently with no conversion of power. As the two waves are supported by currents on the three conductors, their field lines are very similar and so a small disturbance, where the feeding point plays an important part, should easily set the right initial conditions for the launching of the second mode.

Some authors, Martin **[5]**, Fontaine et al **[6]** and Delogne et al **[7]**, following the classical method of characterizing the screening of coaxial cables, Fowler **[8]** and Kunz **[9]**, have considered this problem within the theory of coupled lines, using a quasi-static approach and transmission line theory; this method assumes TEM modes and uses the surface transfer inductance as the major conductive coupling effect. As Delogne **[7]** also points out, ***although it is an extremely useful tool, does not give correct physical interpretation of the phenomena,*** the method is not perfectly correct and, in this instance, inconsistent with our initial assumptions. However, in a real cable, all discrete discontinuities force some degree of power conversion and so it is reasonably acceptable that this problem may be tackled with the theory of coupled lines.

A correct and complete study would need a detailed analysis of the discontinuities with the obvious difficulty of being able to predict their type and position. In this work a very simple criterion will be used which will be approximately true for an infinite and perfect cable and ground; the power will divide itself between the two modes inversely according to their characteristic impedance.

$P_t = P_s + P_f$ (total power = slow wave power + fast wave power)

$$\frac{P_s}{P_f} = \frac{Z_{ch_{f.\omega.}}}{Z_{ch_{s.\omega.}}} = \varepsilon_r \frac{\beta_{f.\omega.}}{\beta_{s.\omega.}} \frac{\ln (2d/r_2)}{\ln (r_2/r_1)} \qquad (15)$$

ε_r being the relative dielectric constant of the inside dielectric and $\beta_{f.\omega.}$ and $\beta_{s.\omega.}$ the propagation constants of the fast and slow waves respectively. When the coverage decreases (higher L_{ST}), the ratio P_s/P_f decreases by a small amount; for a smaller **d**, this decrease is slightly more important. As we could expect, when the distance above the ground increases, the fast wave will have less power.

With the calculated relation between powers of the two waves the coefficients of the fields, may now be normalized.

The influence of a nearby conductive ground plane on the percentage of the slow wave power that travels outside the coaxial structure is shown in figure 3.

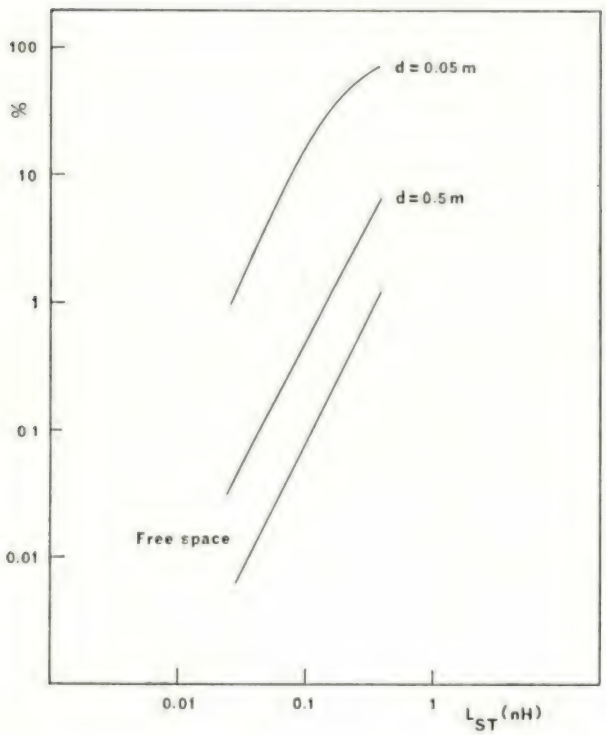


FIG. 3

Percentage of the slow wave power that travels outside the cable; dependence with the surface transfer impedance (L_{ST}) and distance above the ground (d). f = 100 MHz

The curves were calculated for a cable with the dimensions $r_1 = 0.00115$ m and $r_2 = 0.005$ m and we can see the dependence on the surface transfer inductance and the distance above ground. Taking once again the example of cable BICC RPC 5097C ($L_{ST} = 0.1162$ nH) one can realize the influence of the ground; for the FONT cable **[6]**, [7] ($L_{ST} \simeq 0.8$ nH), at d = 0.05 m it can be seen that about 90 % of the slow wave power travels outside which makes this cable, as far as technical problems are concerned, almost as difficult to deal with as a Goubau line.

3.3 — Density of power outside the cable

After having normalized the coefficients, the density of power outside the cable can be calculated. The coupling will be given in dBW and it can be compared to real measurements on the condition that the receiving antenna has 1 m2 of effective aperture and is polarized in the direction of E_r.

At every point in space the fields from the cable and image must be added vectorially which immediately implies that when the cable is very near or on the ground the coupling will be lower, as the contributions from either cable tend to cancel each other.

The curves of density of power versus distance from the cable (along r, at a distance d from the ground), were calculated for a cable with the following dimensions:

$$r_1 = 0.00115 \text{ m}$$
$$r_2 = 0.005 \text{ m}$$
$$\varepsilon_r = 1.3$$

and for f = 100 MHz.

Figures 4 and 5 show the coupling for cables at two different heights above the ground.

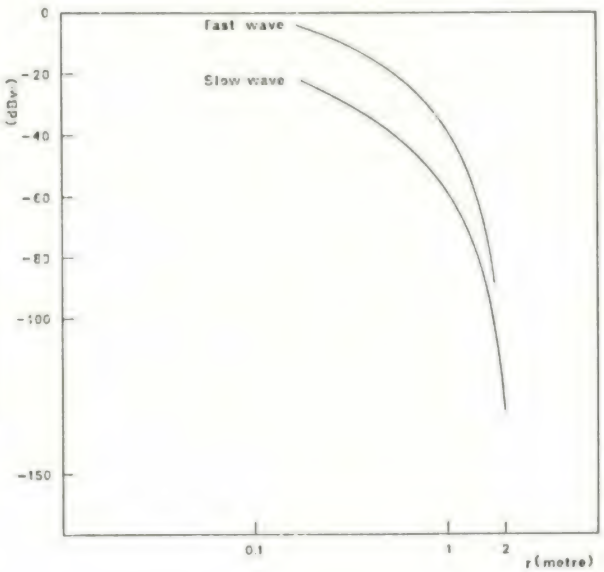


FIG. 4

Density of power outside the cable along a run perpendicular to the cable. $L_{ST} = 0.05$ nH and d = 0.5 m

Slow wave — The distance covered decreases with **d** whilst the coupling near the cable increases. This effect agrees with the results about the percentage of the slow wave that travels outside the coaxial structure; the proximity of the ground implies more power travelling outside (fig. 3), this power being concentrated around the cable and the ground near to it. This implies less losses, as the wave is not supported as much as before by the inner conductor currents where the losses are higher.

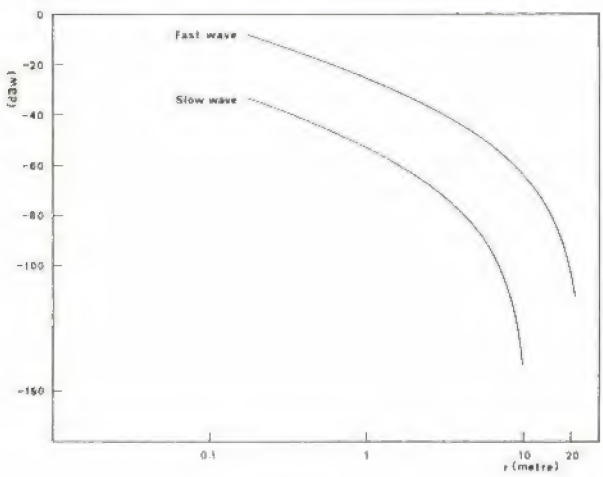


FIG. 5

Density of power outside the cable along a run perpendicular to the cable. $L_{ST} = 0.05$ nH d = 0.5 m

Fast wave — The influence of the ground being nearer is to decrease the radial distance within which communication is possible and tends to increase the coupling very near the cable.

The two waves travel with different velocities and so they will beat with one another producing the normal 'standing waves'. These 'standing waves' will only be measurable when the waves have similar amplitudes which, in general does not happen. Of course the two waves propagate with different conductor losses and in the case of a non perfect ground, they are attenuated differently. It is then difficult to predict where these 'standing waves' will appear and how to avoid them. Another cause of the 'standing waves' which seem to be measured for all types of cable, in all conditions **[10]**, **[11]** is the interference caused by radiation from discontinuities along the cable and transmitter and load ends. Further, this radiation explains the relatively high values of coupling at large distances from the cable **[11]**.

In order to compare theoretical with practical coupling values, the field received by a vertical tuned half wave dipole, 1.8 m above the ground, was calculated. The cable has the characteristics of a BICC RPC5097C and is assumed to be suspended at 1 m and 0.05 m above the ground.

Taking the polarization into consideration and the effective area of the dipole, the following values were calculated and measured, at 3.5 metres from the cable

d(m)	calculated values P(dBW)	measured values P(dBW)
0.05	−64.6	−91.6 *
1	−47.2	−78.6

* Value measured with the cable on the ground.

Good agreement can not be expected, in terms of coupling, as the theoretical prediction is made with a perfect conductive ground plane and the actual measurements were carried out over grass and concrete; these two 'soils' at 100 MHz are no longer conductors but dielectrics exhibiting some conductivity. They will introduce losses and unbalance the twin wire mode therefore introducing quantitative and qualitative differences. Still, the effect of the ground should be noticed.

In the calculated values the increase of coupling (in dB), when d increases, is about 1.36 times. For the measured values the increase was 1.16 times which is slightly less; this difference may be explained by the fact that the losses introduced by the ground will be more important when the cable is nearer the ground (d = 0.05) and so bringing that ratio down.

This effect of the ground was also measured by Cree and Giles **[10]**.

4 — CONCLUSION

An analysis has been presented made on a model of a braided coaxial cable over a perfectly conductive ground. The most important conclusions consists on such structure allowing the simultaneous propagation of a second mode (fast wave) with the coaxial mode (slow wave), which is the normal mode of propagation for a cable in free space. The fast wave (twin wire mode) has a propagation constant very near the free space number (k_o) and radiates practically in the axial direction, such that its constant phase planes are almost parallel to the ones of the slow wave, which are perpendicular to the cable axis. The propagation constant of these two modes is not much affected by the distance to the ground (fig. 2) and the influence of the surface transfer inductance is only important when it reaches values like 1 or 2 nH (a very leaky cable specially designed by Fontaine **[6]** (1973), presents a value of the surface transfer inductance of about 0.82 nH and the cable type RPC5097C from BICC, which is commercially available, presents a value of 0.116 nH). The slow wave propagation constant has practically the same value as in free space with a deviation of about 0.02 % at 3 centimetres from the ground. The two waves present no cut-off frequency and their velocity ratio is fairly independent of the frequency, up to VHF. An increase in the inside dielectric permittivity makes the coaxial mode (slow wave) propagation constant approach k_1 and the twin wire mode (fast wave) propagation constant approach k_o, which implies that the decay of outside fields increases for the former and decreases for the latter.

The two modes propagate simultaneously and, away from discontinuities, no power is transferred from one to the other. They are supported by currents flowing on the inner conductor, both sides of the braid and the conductive ground; however, for the slow wave (coaxial mode) the power travels mainly inside (fig. 3) and for the fast wave (twin wire mode), it travels mainly outside. The distribution of power between the two waves was discussed but not studied in detail; it was assumed that the input power would distribute itself inversely propor-

tionally to the characteristic impedances of the two modes; this criterion shows that when the surface transfer inductance increases (lower electromagnetic coverage) the fast wave will propagate more power; the inverse happens if the distance above ground increases or the inside dielectric is substituted by a higher permittivity one.

The distribution of the slow wave power by the inside and outside of the coaxial structure is an important factor as it gives a measure of the degree of the discontinuity at the feeding point. The presence of a near conductive plane makes more power travel outside and so worsens the discontinuity at the feeding point which implies that more power will be radiated by higher modes generated at this end of the cable.

The coupling is normally made through the twin wire mode (fast wave) except for very high values of the surface transfer inductance. The fields extend a good deal more than in a free space situation, reaching 20 metres well above the noise level, for small values of L_{ST} and a distance above the ground not too small. The levels of coupling predicted in this model are much closer to the measured values than the ones predicted in free space **[1]**, but we are still far from a good agreement. The fields measured at great distances from the cable must be due to radiation from feeding and load ends and other discontinuities affecting the propagating waves, a fact that is well supported by theory and measurements. As for the near fields it could only be expected a good agreement with a theoretical model which would take into account the electromagnetic characteristics of a real soil. Still, the degree of agreement was fairly good concerning the influence of the proximity of the ground.

The consideration of a perfectly conductive ground plane is a useful step towards the building of a theoretical model which would reflect the real conditions of a system, however, it presents an important limitation as far as high frequencies are concerned. As stated in the introduction, a dry concrete roadway can be considered a conductor only up to 300 kHz and a typical wet soil up to 60 MHz; this is one of the important limitations of the model. A poor conductivity and a high power factor of the ground plane must introduce qualitative and quantitative differences the most important one being the probable substitution of the fast wave by a second surface wave.

Another aspect which in a real system turns out to be of primary importance, and not considered in this model, is the almost unavoidable radiation produced by higher modes launched at discontinuities affecting the waves propagation. This radiation must contribute to the existence of the 'standing waves' and the relatively high values of the coupling at very large distances from the cable.

AKNOWLEDGEMENTS

The major part of this paper relates to work carried out a Standard Telecommunication Laboratories, Harlow and permission to publish is aknowledged with thanks. The author particularly wishes to thank Mr. Quin V. Davis, from the University of Surrey, for his helpful discussions and advices.

The contribution of Mr. Rolf Johannessen, Mr. Peter Deane and Mr. John Greenwood, from S.T.L., are also gratefully acknowledged.

Further investigation in this matters is being pursued at the Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, under the supervision of Prof. Manuel Abreu Faro.

REFERENCES

[1] **Fernandes, A. S. C.** — *Propagation Characteristics of a Loose Braid Coaxial Cable in Free Space.* Journal of the I. E. R. E., 1979, Vol. 49, N.º 5, pp. 255-60, Maio.

[2] **Mayhan, R. J.** and **R. E. Bailey** — *An indirect Measurement of the Effect Dielectric Constant Loss Tangent of Typical Concrete Roadways.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, July 1975, pp. 565-569.

[3] **Meyerhoff, A. A.** — *Interaction Between Surface-wave Transmission Lines.* Proceedings of the IRE, September 1952, pp. 1061-1065.

[4] **Haining, R. W.** — *Experimental Modelling of Leaky Feeders.* Symposium on Leaky Feeder Radio Communication Systems. University of Surrey, April 1974, pp. 236-241.

[5] **Martin, D. J. R.** — *Transferred Surface Currents in Braided Coaxial Cables.* Electronic Letters, Vol. 8, N.º 18, September 1972.

[6] **Fontaine, J., B. Demoulin, P. Degauque** and **R. Gabillard** — *Feasibility of a Radiocommunication in Mine Galleries by Means of a Coaxial Cable, having a high Coupling impedance.* Through the Earth Electromagnetics Workshop, Colorado School of Mines, August 1973.

[7] **Delogne, P. P.** and **M. Safak** — *Electromagnetic Theory of the Leaky Coaxial Cable.* Journal of the I. E. R. E., Vol. 45, N.º 5, May 1975, pp. 233-240.

[8] **Fowler, E. D.** — *Observations on the Use of $Z_T(C)$ for Comparing the Breakthrough Capacitance of Cable Braids.* International Electrotechnical Commission, DOC SC 46A/WG1 (Fowler) 3.

[9] **Kunz, H.** — *Die Anregung Von Goubauwellen durch unvollstanding Abgeschirmte Koaxial Kabel.* Mitteilungen der Arbeitsgemeinscharft fur Elektrische Nachrichtentechnik der Stiftung Hasler-Werbe Bern (AGEG) Nr. 14, 1972.

[10] **Cree, D. J.** and **L. J. Giles** — *Practical Performance of Radiating Cables.* Journal of the I. E. R. E., Vol. 45, N.º 5, May 1975, pp. 215-223.

[11] **Fernandes, A. S. C., P. O. Harms** and **R. Johannessen** — *Some Engineering Considerations Affecting the Use of Radiating Cables in Communications between Vehicles and Trafic Control Centres.* Symposium on Leaky Feeder Radio Communication Systems, University of Surrey, April 1974, pp. 82-96.

JÁ À VENDA

PROPAGAÇÃO E RADIAÇÃO DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

M. DE ABREU FARO
Professor do I. S. T.

1 ONDAS E MEIOS MATERIAIS PREÇO: **560$00**

★

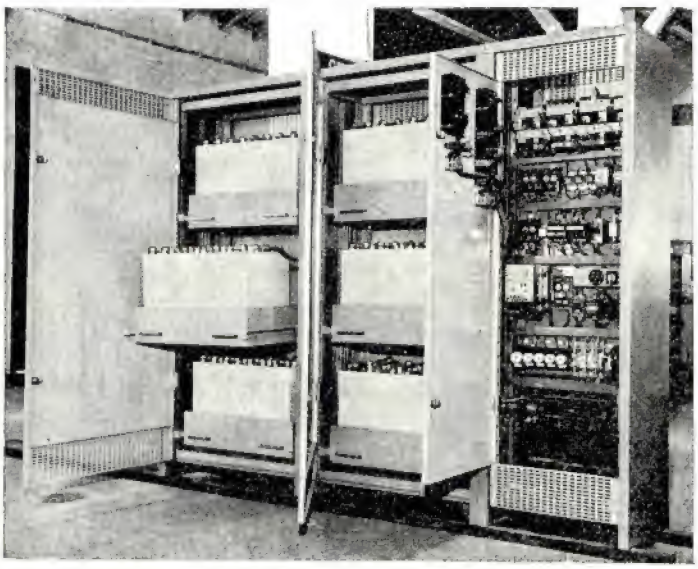
2 RADIAÇÃO PREÇO: **560$00**

DESCONTO:
10 % aos Assinantes

PEDIDOS À TÉCNICA

TUDOR

Alimentadores de C.C. para Serviço Estacionário



A TUDOR projecta e fabrica alimentadores e carregadores de bateriais para todos os fins obedecendo às mais exigentes especificações.

Características Eléctricas

Carregador Principal

- Tensão de alimentação . . 3 x 380 V ± 10% 50 Hz ± 5%
- Potência Nominal . . . . .3x3 KW
- Funcionamento . . . . . .Regime flutuante estabilizado

Carregador Adicional

- Potência Nominal . . . . .0,3 KW
- Funcionamento . . . . . .Regime Tampão

Bateria

- Alcalina de Cádmio Níquel

BLOCO para alimentação de permanência e Socorro dos equipamentos de Protecção e Comando dos Serviços Auxiliares das subestações.
Fabricado para a EDP e E.P.

SOCIEDADE PORTUGUESA DO ACUMULADOR TUDOR, SARL. R. Actor Tasso 1 — Tel. 56 21 12

A utilização da energia das ondas marítimas (*)

ANTÓNIO F. DE O. FALCÃO
Instituto Superior Técnico
e Centro de Termodinâmica Aplicada
e Mecânica dos Fluidos da Universidade
Técnica de Lisboa (I. N. I. C.)

SUMÁRIO

É feita uma análise sumária das potencialidades das ondas marítimas como fonte de energia, e apresenta-se um panorama geral da investigação e desenvolvimento de dispositivos para aproveitamento dessa energia em curso em vários países.

SUMMARY

The paper presents a brief analysis of the power available from sea waves, followed by a survey of the research on, and development of, devices used for wave-energy extraction in several countries.

1 — INTRODUÇÃO

A crise energética, que se tornou particularmente sensível na última meia-dúzia de anos, trouxe como consequência um aumento do interesse no aproveitamento das fontes de energia renováveis. Entre estas, a energia das ondas marítimas afigura-se particularmente promissora para Portugal, tanto ao longo da costa do continente como junto às ilhas do Atlântico.

Embora o estudo das ondas de gravidade (ou de superfície) constitua um capítulo clássico da hidrodinâmica, a bibliografia especificamente dedicada ao aproveitamento desta forma de energia apenas começou a tornar-se significativa por volta de 1976, tendo desde então o assunto sido objecto de investigações a um ritmo sempre crescente, especialmente na Grã-Bretanha, como adiante referiremos mais em pormenor. O início mais tardio do estudo e desenvolvimento da utilização deste tipo de energia, em comparação com a solar e a eólica, pode ser explicado em parte pela sua considerável complexidade do ponto de vista teórico e pelos problemas tecnológicos envolvidos. Um outro factor de dificuldade consiste em o aproveitamento da energia das ondas só aparecer como praticamente viável se feito em grande escala, o que não encoraja a iniciativa de pequenas empresas e investigadores isolados.

A maioria dos resultados teóricos referentes às ondas de superfície baseiam-se na chamada teoria linear, em que se supõe que a amplitude H das ondas é pequena comparada com o seu comprimento λ. Dado que na ondulação oceânica a maior parte do fluxo de energia é devido a ondas cujos comprimentos são da ordem das muitas dezenas ou algumas centenas de metros, conclui-se facilmente que a hipótese que conduz à linearização se verifica com boa aproximação nos casos que nos interessam aqui. Os breves apontamentos teóricos que se seguem baseiam-se na teoria bi-dimensional linear das ondas sinusoidais, e, a menos que se diga expressamente o contrário, referem-se ao caso de águas profundas, ou seja em que a profundidade h é maior do que cerca de meio comprimento de onda.

No caso de águas profundas, a potência média P, por unidade de comprimento de crista, transmitida por uma onda sinusoidal (bi-dimensional) com período T, é dada por

$$P = \frac{\rho g^2}{32\,\pi} H^2 T,$$

em que ρ é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade e H a amplitude da onda sinusoidal (diferença entre os níveis da crista e da cava da onda). A potência P representa pois a energia que, em média, atravessa um plano vertical perpendicular à direcção de propagação, por unidade de tempo e por unidade de comprimento de crista da onda. Se, por exemplo, tomarmos uma onda com o período T=12s e amplitude H=3 m, obtemos o resultado P=103 kW/m.

A velocidade de propagação ou celeridade das

(*) Este artigo reproduz, com ligeiras alterações, um relatório preparado, em Dezembro de 1979, para a Direcção Geral de Energia, e baseia-se, em grande parte, em comunicações apresentadas no Symposium on Wave Energy Utilization, que se realizou, de 30 de Outubro a 1 de Novembro de 1979, na Chalmers University of Technology, em Gotemburgo, Suécia. O artigo resulta também da actividade de investigação que o autor tem desenvolvido no CTAMFUTL.

Manuscrito recebido para publicação em 23/4/80.

ondas, c, depende do período T (ao contrário do que sucede com as ondas sonoras) e é dada por

$$c = \frac{gT}{2\pi}.$$

Para o comprimento de onda, λ, obtemos

$$\lambda = cT = \frac{gT^2}{2\pi}.$$

No exemplo acima considerado, obtêm-se $c=18{,}7$ m/s e $\lambda=225$ m. Note-se que c é a velocidade a que se deslocam as cristas das ondas (e que é facilmente observável). Este valor não deve ser confundido com a velocidade U a que se propaga a energia e que, no caso de águas profundas, é exactamente $U=c/2$. (No caso de ondas sonoras, é simplesmente $U=c$).

Note-se ainda que a potência P depende, não só da amplitude H, mas também do período T (ou do comprimento de onda λ). Exprimindo T em função de λ, obtemos uma expressão para P equivalente à que foi apresentada acima:

$$P = \frac{\rho}{16}\sqrt{\frac{g^3}{2\pi}}\,H^2\sqrt{\lambda}.$$

Se a profundidade h da água for consideravelmente menor do que $\lambda/2$, estas expressões deixam de ser aplicáveis, passando a intervir também a profundidade h. Em particular, para um dado período T, a celeridade c, e portanto também o comprimento de onda $\lambda=cT$, diminuem quando h diminui. Assim, no caso do exemplo acima considerado, em que $T=12$ s, obtêm-se, para diferentes profundidades de água, os seguintes valores teóricos

$h=\infty$	$c=18{,}7$ m/s	$\lambda=225$ m
$h=50$ m	$c=17{,}1$ m/s	$\lambda=205$ m
$h=20$ m	$c=12{,}7$ m/s	$\lambda=152$ m
$h=10$ m	$c=9{,}4$ m/s	$\lambda=113$ m

Para mais pormenores, vejam-se, por exemplo, **[1]** e **[2]**.

2 — POTÊNCIA DISPONÍVEL

Na realidade, as ondas que se formam e propagam no oceano não são sinusoidais, nem bi-dimensionais, nem a sua direcção de propagação é constante e bem definida. No entanto, é em geral possível encontrar uma direcção de propagação mais ou menos bem definida. Por outro lado, as ondas reais, pelo menos na medida em que se possam considerar como bi-dimensionais, podem decompor-se em ondas sinusoidais, cujos períodos T (ou frequências $f=1/T$) formam um espectro contínuo, de acordo com conhecidos métodos da análise matemática. Isto significa que o fluxo de energia, em vez de estar associado a um período ou frequência definidos, está distribuído por uma gama de frequências f relativamente extensa: $P=P(f)$. Neste caso, $P(f)$ passa a ser uma energia por unidade de tempo, de comprimento e de frequência (kW/m.Hz). A potência total P_{tot} obtém-se por integração

$$P_{tot} = \int_0^\infty P(f)\,df.$$

Sendo a ondulação oceânica um fenómeno em larga medida aleatório, as potências instantâneas $P(f)$ e P_{tot} variam fortemente com o local e com o tempo. É por isso necessário tomar valores médios ao longo dum intervalo de tempo que seja grande comparado com os valores típicos do período T. Mais particularmente interessa considerar o valor médio anual, que iremos representar por $\overline{P}(f)$ ou $\overline{P}_{tot}$. Como é evidente, estes valores médios anuais variam muito menos do que os respectivos valores instantâneos e caracterizam zonas relativamente extensas do oceano ou da costa. O seu conhecimento é essencial para se avaliarem as possibilidades de aproveitamento da energia das ondas numa dada região e para se dimensionarem as instalações usadas para esse fim. Note-se em particular que os dispositivos hidro-mecânicos utilizados têm um rendimento hidrodinâmico máximo para uma dada frequência f (dependente das dimensões do sistema e doutros factores), pelo que devem ser sintonizados para a frequência em torno da qual $\overline{P}(f)$ tem os valores mais elevados.

Embora haja abundantes dados experimentais referentes à ondulação oceânica em grande número de pontos do globo, é relativamente escassa a informação de confiança sobre a potência transmitida pelas ondas e a sua distribuição espectral (embora em certos casos seja possível obter tal informação por processamento de registos existentes).

Na Grã-Bretanha (provavelmente o país onde o aproveitamento da energia das ondas têm sido objecto de maior esforço de desenvolvimento), o valor de $\overline{P}_{tot}$ tomado como base, até há relativamente pouco tempo, era de cerca de 80 kW/m. Este valor tinha sido obtido a partir de registos efectuados pelo navio oceanográfico India, estacionado a Oeste das Ilhas Britânicas. Admitia-se, além disso, que a maioria da potência se concentrava entre os períodos de 7 e 11 s (correspondentes a comprimentos de onda de cerca de 80 a 200 m). Estes valores eram ainda aceites, como representativos das condições junto à costa ocidental das Ilhas Britânicas, em trabalhos publicados no início de 1979. Medições mais recentes, efectuadas junto à ilha de South Uist (arquipélago das Outer Hebrides, junto à costa ocidental da Escócia), revelaram o valor médio anual menos optimista $\overline{P}_{tot}=48$ kW/m, com a maior concentração espectral em períodos de 10 a 14 s ($\lambda=160$ a 300 m). Estes valores foram (tanto quanto é do nosso conhecimento) divulgados pela primeira vez na Conference on Power from Sea Waves (Edimburgo, Junho de 1979). A Fig. 1 mostra a distribuição espectral da potência, ou seja a função $\overline{P}(f)$ (*). Medições

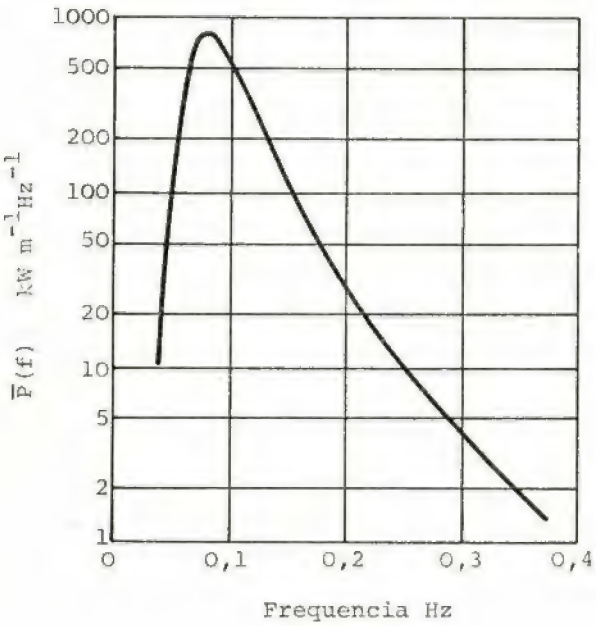


FIG. 1

Densidade espectral do fluxo de energia (kW m^{-1} Hz^{-1}) em função da frequência. Valores médios anuais medidos junto à Ilha de South Uist (costa ocidental da Escócia)

efectuadas noutros locais da costa ocidental das Ilhas Britânicas (nomeadamente na Escócia) deram valores de $\overline{P}_{tot}$ de cerca de 50 kw/m, confirmando o resultado referido acima.

Embora se tenham realizado numerosos registos de ondulação junto à costa portuguesa, a sua finalidade foi, em geral, a da previsão do comportamento de obras costeiras e não o apuramento do conteúdo energético das ondas. É no entanto de presumir que tanto o valor $\overline{P}_{tot}$=50 kw/m como a curva da Fig. 1 se apliquem aproximadamente à costa ocidental portuguesa, como médias anuais. Tomando um comprimento de costa de 500 km, obtém-se, por simples multiplicação, o valor de 25 000 MW (média anual) para a potência total disponível na costa ocidental portuguesa.

3 — ALGUNS TIPOS GERAIS DE DISPOSITIVOS HIDRO-MECÂNICOS PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS

É grande o número e variedade de dispositivos que, nas últimas décadas, têm sido propostos para utilização da energia das ondas. Na secção 4 deste relatório, a propósito dos programas em curso em alguns países, faremos referência a alguns sistemas de aproveitamento actualmente em fase de estudo ou de desenvolvimento. Nesta secção 3, limitar-nos-emos a considerações de carácter geral sobre dois tipos genéricos nos quais se incluem alguns dos dispositivos hidro-mecânicos que se afiguram mais promissores e aos quais tem sido dedicado grande esforço de estudo e desenvolvimento.

3.1 — Começaremos por considerar os sistema em que o órgão fundamental é um corpo sólido, simples ou articulado, flutuante ou (mais raramente) totalmente submerso, que oscila por acção da ondulação marítima, sendo este movimento (rotação, translação ou complexo) utilizado para a produção de energia útil. Estão incluídos neste tipo os «patos» de Salter (*Salter's ducks*), a jangada de Cockerell, o sistema de três placas (*triplate converter*), o cilindro horizontal oscilante submerso e os sistemas pontuais de absorção ressonante.

Estes dispositivos procuram conseguir um elevado grau de extracção de energia (rendimento) por dois métodos: a) com a utilização dum sistema articulado, em que os vários elementos (em geral dois ou três) estão colocados uns atrás dos outros (jangada de Cockerell, sistema de três placas); b) com a utilização do fenómeno de ressonância (os restantes três sistemas mencionados acima). Este fenómeno é bem conhecido. O sistema (corpo sólido na água) está sujeito a forças generalizadas (forças e momentos) que promovem o retorno à posição de equilíbrio. A estas forças, e à massa (e/ou momento de inércia) do corpo (incluindo a massa de água arrastada pelo corpo: *added mass*), corresponde uma frequência própria de oscilação, como sucede com os sistemas mecânicos susceptíveis de oscilar. Verifica-se teórica e experimentalmente que a potência transferida das ondas para o corpo é máxima em condições de ressonância, isto é quando a frequência própria for próxima da frequência das ondas. Por analogia com outras aplicações, podemos dizer que o corpo está sintonizado com o comprimento de onda. Em tais condições o corpo efectua oscilações com grande amplitude (que pode ser várias vezes superior à amplitude da onda incidente), sendo a amplitude tanto maior quanto menores forem as dimensões do corpo (para os mesmos valores de λ e da amplitude H da onda). É assim possível conseguir um bom rendimento de extracção com um corpo cujas dimensões são muito menores do que λ, o que torna este princípio de funcionamento altamente atraente do ponto de vista económico. Há no entanto que ter em conta um outro factor importante. Efectivamente, as ondas reais não são monocromáticas e por isso é necessário ter em consideração a curva de resposta do sistema para comprimentos de onda λ diferentes do valor correspondente à frequência própria. A teoria e a experiência mostram que a curva do rendimento $\eta(\lambda)$ apresenta, para $\lambda=1/f_0$ (f_0=frequência própria do sistema), um pico tanto mais estreito quanto menor for a relação L/λ (L=dimensão característica do corpo). Isto significa que, se as dimensões do corpo forem muito pequenas, ele é capaz de absorver eficientemente apenas a energia correspondente a frequências muito próximas da sua frequência própria de oscilação. Há pois que estabelecer um

(*) A Fig. 1 deve ser tomada como dando apenas uma representação qualitativa, pois a curva foi obtida por «desenho à vista» a partir dum diapositivo projectado em Edimburgo na Conference on Power from Sea Waves.

compromisso entre o baixo custo dum sistema de pequenas dimensões e a sua menor capacidade de captação de energia das ondas reais. Este é o problema que se põe, por exemplo, no caso dos patos de Salter. Para uma análise teórica geral deste problema, consultar o trabalho de Evans [3].

3.2 — O segundo tipo genérico a que nos referiremos é aquele em que o movimento da água, devido à ondulação, é *canalizado* por uma conduta ou sistema de paredes parcial ou totalmente submersas, de modo a que a água efectue no seu interior um escoamento oscilatório. A energia útil é produzida por uma turbina hidráulica ou, de preferência, por uma turbina de ar accionada pelo escoamento alternativo de ar deslocado pelo movimento da superfície livre da água. São deste tipo o sistema de Masuda, em adiantado estado de desenvolvimento no Japão, o sistema do National Engineering Laboratory (Glasgow) e ainda o sistema do inventor português Agnelo David, todos três apresentando grande semelhanças entre si, com uma câmara de ar e uma turbina de ar situadas acima do nível da água, numa plataforma flutuante (Masuda, N. E. L.) ou fixa (N. E. L., A. David). Um sistema diferente, totalmente submerso, está a ser desenvolvido pela firma inglesa Vickers Limited (condutas ressonantes submersas).

Também neste caso a ressonância desempenha um papel importante. A água, no interior da conduta ou câmara, tem uma frequência própria de oscilação, que depende fundamentalmente do comprimento da coluna de água. À semelhança do que foi referido para os corpos oscilantes, em 3.1, também aqui a curva $\eta(\lambda)$ apresenta um máximo para condições de ressonância, sendo o pico tanto mais estreito quanto menor for a dimensão transversal da conduta em relação ao comprimento de onda λ. A título indicativo, podemos apresentar o valor de 23 m que deve ter o comprimento duma coluna de água numa conduta vertical aberta inferiormente para que a sua frequência própria seja de 0,1 Hz (T=10 s) (cálculo efectuado a partir dum estudo teórico apresentado por Evans [4]).

4 — ACÇÃO DESENVOLVIDA EM VÁRIOS PAÍSES

É interessante assinalar o modo como se distribuiram por países as comunicações e as participações no simpósio de Gotemburgo, pois é um indicativo do interesse e actividade neste assunto.

Comunicações		Participantes inscritos			
Reino Unido	10	Suécia	42	Brasil	1
Suécia	4	Reino Unido	18	Itália	1
Noruega	2	Noruega	14	Suíça	1
U. S. A.	2	U. S. A.	8	Polónia	1
Japão	1	Irlanda	4	Ilhas Faroe	1
R. F. A.	1	França	3	Holanda	1
Canadá	1	R. F. A.	3	Canadá	1
Finlândia	1	Dinamarca	2	Japão	1
Itália	1	Mónaco	2	Finlândia	1
Hong-Kong	1	Portugal	1		
Mónaco	1	Espanha	1	Total	107

Destes números (particularmente os referentes às comunicações) ressalta a posição cimeira do Reino Unido, seguido da Noruega e U. S. A. Os números referentes à Suécia, país organizador, devem evidentemente ser analisados com uma bitola diferente.

Seguidamente apresentaremos, separadamente, a actividade que tem sido desenvolvida em alguns destes países, limitando-nos a uma descrição geral. Mais pormenores podem ser encontrados nas comunicações ao simpósio e em outras publicações.

4.1 — Reino-Unido

Dedicaremos especial atenção a este país, por ser aquele onde o assunto têm tido maior desenvolvimento e do qual temos informação mais detalhada.

Ao contrário do que tem sucedido no Japão, onde avultadas somas têm sido gastas com um único projecto, a política governamental no Reino-Unido tem sido no sentido de financiar, em regime de concorrência, um número considerável de projectos, apoiados por cuidadosa investigação teórica e experimental efectuada em várias universidades e outras instituições. Conforme forem positivos ou não os resultados referentes aos diferentes projectos, assim o financiamento será reforçado ou abandonado, prevendo-se que, dentro de poucos anos se concentre apenas em três ou quatro projectos que se tenham revelado mais satisfatórios.

O desenvolvimento do aproveitamento da energia das ondas é coordenado pela Energy Technology Support Unit (ETSU), por intermédio da qual é canalizada grande parte das verbas de financiamento. A ETSU é uma agência governamental do Departamento de Energia, localizada em Harwell, e é responsável pelo desenvolvimento das fontes de energia renováveis e pela avaliação da sua viabilidade económica e da sua contribuição para o abastecimento energético do Reino-Unido.

O Departamento de Energia iniciou o seu programa de investigação e desenvolvimento da utilização da energia das ondas em fins de 1975, tendo as primeiras verbas sido concedidas em Abril de 1976, no montante de 1 milhão de libras, para estudos iniciais sobre a viabilidade do empreendimento. Tendo sido realizados progressos consideráveis, a verba foi aumentada, em 1977, para 2,5 milhões de libras para ampliar os estudos e permitir a realização de alguns ensaios com modelos à escala de 1/10. Em Abril de 1978, a verba foi novamente aumentada para 2,9 milhões de libras para mais ensaios e estudos mais desenvolvidos. O programa pode dividir-se fundamentalmente em duas partes: a) desenvolvimento de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia mecânica utilizável (*wave-energy converters*); b) investigação em problemas afins, nomeadamente informação pormenorizada sobre ondas reais e clima, sistemas de fixação, estruturas, geração e transmissão de energia eléctrica, impacto sobre o ambiente. De entre os primeiros dispositivos examinados pelo Departamento de Energia, e que podemos considerar como constituindo a primeira geração de sistemas, mencionaremos seguidamente os quatro mais importantes:

— Os patos de Salter (*Salter's ducks*), em estudo há vários anos na Universidade de Edimburgo, em associação com as firmas Ready Mixed Concrete e John Laing & Co. Ltd. Este dispositivo é um dos mais conhecidos e tem sido objecto de várias comunicações a reuniões (veja-se **[A.3]**) e artigos de revistas (veja-se o artigo recente **[5]**). S. H. Salter, em 1974, mostrou experimentalmente que uma came bi-dimensional (Fig. 2), oscilando em torno dum eixo fixo (paralelo às

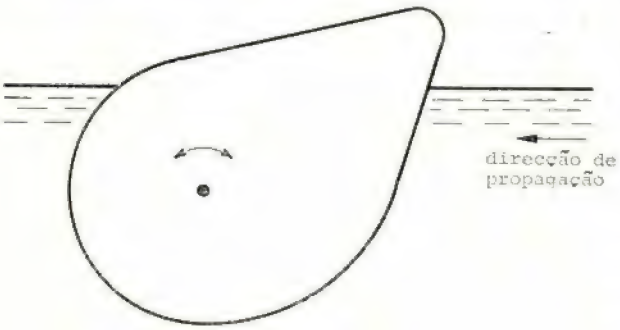


FIG. 2

Pato de Salter

cristas das ondas), pode ser utilizada para extrair energia das ondas, com rendimentos da ordem dos 80-90%. Estudos teóricos posteriores confirmaram a possibilidade de se obterem elevados rendimentos. Cedo se reconheceu a impossibilidade prática de se manter fixo o eixo de rotação (uma vez que o sistema é flutuante). Estudos teóricos e experimentais mostraram que este facto pode reduzir apreciavelmente o rendimento atingível. No entanto, desde que o sistema seja convenientemente dimensionado, podem-se, ainda assim, alcançar rendimentos superiores a 50 %. Foram considerados sucessivamente vários processos para transformação do movimento oscilatório de rotação em energia útil. Está actualmente em estudo um sistema que inclui dois giroscópios dentro de cada pato, possibilitando uma perfeita estanquecidade. Entre os problemas também em estudo, é de referir o dos esforços a que estão sujeitos os órgãos de articulação entre patos vizinhos. Salientamos ainda que a Universidade de Edimburgo está dotada de excelente equipamento para o estudo experimental do aproveitamento da energia das ondas. Além dum canal com capacidade para gerar ondas (bi-dimensionais) com qualquer forma (e onde grande parte dos ensaios dos patos têm sido realizados), dispõe dum tanque, especialmente construído para este tipo de ensaios e recentemente concluído, com 75 batedores com movimento independente controlado por computador, podendo simular qualquer tipo de ondulação tri-dimensional.

— A jangada articulada (*wave-contouring raft*), originalmente criada por «Sir» Christopher Cockerell (inventor do *overcraft*). Este dispositivo, que está a ser desenvolvido pela firma Wavepower Limited, de Southampton, é constituído por uma série de pontões flutuantes (dois ou três), articulados em série segundo a direcção predominante de propagação das ondas, de modo a seguir aproximadamente a forma da superfície da água (Fig. 3). O binário provocado nas articulações

FIG. 3

Jangada articulada de Cockerell

é utilizado para a produção de energia útil, possivelmente por intermédio de motores hidráulicos. A informação publicada sobre este sistema é relativamente escassa.

— A coluna de água oscilante (*oscillating water column*), em desenvolvimento no National Engineering Laboratory (NEL), de Glasgow, em associação com a firma Roxburg and Partners. Fundamentalmente, este sistema é constituído por uma câmara aberta na parte inferior (por onde comunica com a água exterior) e na parte superior (Fig. 4). As ondas fazem a água oscilar

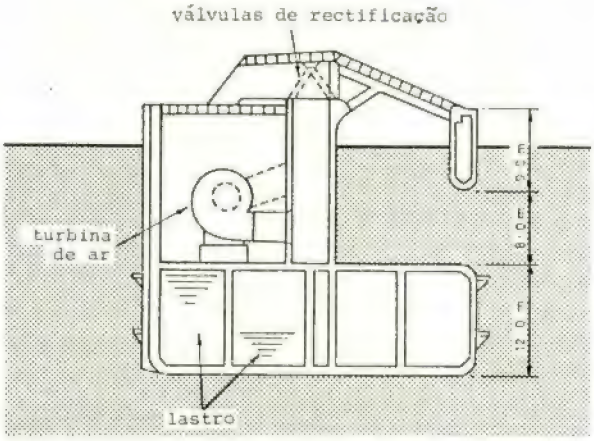


FIG. 4

Coluna de água oscilante (versão de betão armado)

no interior e o ar é forçado a passar, em sentidos alternados, pelo orifício superior, accionando uma turbina. A turbina de ar é do tipo Francis mais ou menos clássico, havendo um sistema de válvulas para rectificação do escoamento de ar. O NEL tem procurado optimizar a câmara e a turbina, de modo a conseguir-se melhor rendimento, tirando partido do fenómeno de ressonância a que fizemos referência atrás (secção 3.2). O estado actual de desenvolvimento deste dispositivo foi relatado em **[A.14]**. Prevê-se que as câmaras pneumáticas venham a ser associadas em grupos. Uma configuração consiste em formar uma linha paralela à crista das ondas, a que os técnicos do NEL chamam um *terminator*. Um outro modo de associação (*attenuator*) corresponde a ter as câmaras alinhadas segundo a direcção de propagação das ondas, sendo a energia de cada

onda gradualmente extraída pelas sucessivas câmaras pelas quais vai passando. Esta segunda disposição é a que foi escolhida no sistema *Kaimei* em desenvolvimento no Japão. O conjunto das câmaras é flutuante (embora se encare a possibilidade de ficar assente no fundo, em águas pouco profundas). Os materiais a utilizar na estrutura poderão ser o aço ou o betão armado.

— O rectificador, em desenvolvimento na Hydraulics Research Station, em associação com a firma Taylor Woodrow Limited. Trata-se dum dispositivo assente no fundo do mar (com a parte superior emersa), que consiste fundamentalmente em dois reservatórios, um por cima do outro, com uma parede vertical perpendicular à direcção de propagação das ondas na qual está montado um sistema de válvulas unidireccionais tipo *flap*, que permitem que a água entre no reservatório superior quando o nível exterior é elevado (crista da onda) e saia do reservatório inferior quando o nível exterior é baixo (cava da onda). A diferença entre os níveis da água nos dois reservatórios é aproveitada por uma turbina hidráulica.

Todos estes quatro sistemas foram objecto de estudos teóricos, e de ensaios à escala de 1/100 em canal ou tanque de ondas. Os dois primeiros (pato e jangada articulada) foram posteriormente ensaiados, à escala 1/10, em condições mais próximas das reais, no lago de Loch Ness e no Solent, tendo, nestes ensaios, sido obtidas potências de vários kW.

A ETSU efectuou recentemente estudos económicos para apurar, aproximadamente, o custo da produção de energia utilizando os quatro sistemas. Os valores mais recentes, referidos no simpósio de Gotemburgo por Clive Grove-Palmer da ETSU, são de cerca de 10 pence/kWh ou um pouco menos, para os patos de Salter e para a jangada de Cockerell, esperando-se que a coluna de água oscilante possa brevemente atingir custo semelhante. Estes cálculos referem-se a aproveitamento em grande escala, com o equipamento fabricado em séries relativamente grandes. O sistema do rectificador não deve conseguir alcançar aquele valor e provavelmente será posto de parte. O desenvolvimento dos outros três dispositivos deverá continuar, tendo em vista o abaixamento do custo unitário de energia, havendo esperanças fundadas numa redução apreciável.

Entretanto entraram na competição vários outros dispositivos, que estão igualmente a ser considerados e subsidiados pela ETSU, e que constituem a segunda geração. Iremos referir os seguintes:

— Um sistema constituído por um longo saco de borracha flexível, ligado a uma viga de betão, oca e flutuante, colocada paralelamente à direcção de propagação das ondas. O saco está dividido numa série de compartimentos, que são comprimidos ou expandidos por acção das ondas que, exteriormente, se deslocam ao longo do seu comprimento, provocando, no interior da viga, um escoamento de ar que acciona uma turbina. Este dispositivo foi criado pelo Prof. M. J. French, da Universidade de Lancaster, e tem sido desenvolvido, nesta universidade, em associação com a firma Wavepower Limited. Para uma descrição mais detalhada, veja-se [A.19].

— Um dispositivo totalmente submerso baseado na coluna de água oscilante (*submerged resonant duct*), em desenvolvimento pela firma Vickers Limited. O sistema está situado a uma distância de cerca de 15 metros da superfície, de modo a ficar protegido dos efeitos das tempestades. Um extenso estudo teórico foi recentemente publicado pelo Prof. «Sir» James Lighthill, da Universidade de Cambridge [6], admitindo uma configuração bi-dimensional. Para o correspondente estudo experimental, ver [7]. Resultados teóricos tri-dimensionais foram relatados (mas não publicados) pelo Prof. Lighthill na Conference on Power from Sea Waves (Edimburgo, Junho de 1979) e confirmam, nas suas linhas gerais, as conclusões da análise bi-dimensional. O sistema, na sua configuração tri-dimensional, está representado esquematicamente na (Fig. 5). A conduta

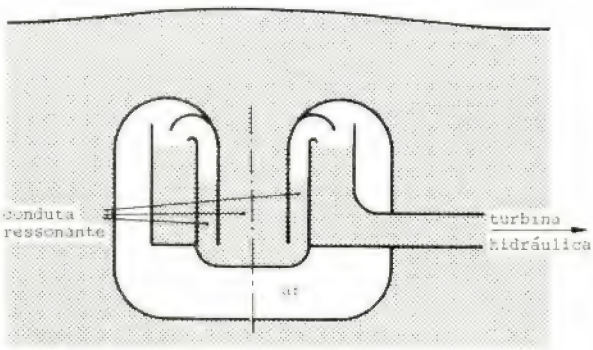


FIG. 5

Conduta ressonante submersa (Vickers Limited) em configuração tri-dimensional

submersa tem uma forma axi-simétrica e comunica com o oceano por uma abertura circular e com uma câmara de ar por uma abertura anular. Em ondas sinusoidais, a ondulação dá origem a uma oscilação ressonante da água na conduta, provocando, periodicamente, um transbordo de água da conduta para um reservatório que alimenta uma turbina hidráulica. A turbina aproveita a queda correspondente à diferença entre o nível da superfície livre da água no reservatório e o nível médio da superfície livre da água na parte anular da conduta ressonante. Encara-se também a possibilidade de eliminar o reservatório e utilizar directamente uma turbina de ar (possivelmente do tipo reversível, inventado pelo Prof. Wells, a que se fará referência abaixo).

— Um cilindro circular horizontal submerso, em estudo na Universidade de Bristol, com o apoio da firma Robert McAlpine Limited. O cilindro tem eixo paralelo à crista das ondas e, numa análise bi-dimencional, o seu centro descreve uma órbita circular com período igual ao do período da onda (sinusoidal) (Fig. 6). Estudos teóricos, baseados num modelo físico bi-dimensional, com ondas sinusoidais, mostram que é possível extrair a totalidade da energia transportada pela onda incidente (rendimento 100 %) desde que a frequência própria de oscilação do cilindro esteja devidamente sintonizada com a frequência das ondas (ve-

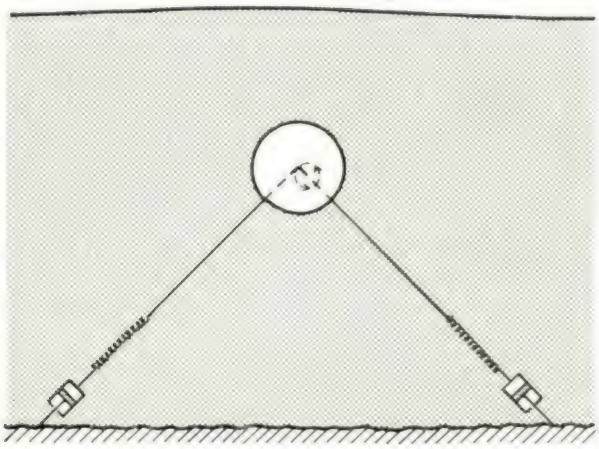


FIG. 6

Cilindro horizontal oscilante com órbita circular (esquemático)

jam-se [8, 9]. Neste dispositivo, as forças que tendem a restaurar as condições de equilíbrio são constituídas pela força hidrostática de impulsão e pelas forças elásticas exercidas pelos cabos de amarração. A energia é transmitida ao exterior por intermédio das forças e movimentos destes cabos.

— Um sistema constituído fundamentalmente por três placas verticais, paralelas à crista das ondas, em desenvolvimento no Royal Military College of Science, Shrivenham. O dispositivo é flutuante e as placas estão parcialmente imersas e distam entre si $\lambda/4$ e $\lambda/2$ (Fig. 7), sendo λ o comprimento de onda para o qual o sistema está optimizado. Procuraremos dar uma ideia do princípio de funcionamento deste sistema. Para mais pormenores, consultar [A.25]. As placas 2 e 3 estão rigidamente ligadas entre si, e, como estão afastadas uma da outra de $\lambda/2$, a resultante das forças horizontais exercidas pela onda é (aproximadamente) nula, de modo que o conjunto das duas placas funciona como a parte *fixa* do sistema. Na ausência da placa 1, a onda incidente é (parcialmente) reflectida na placa 2, originando-se uma onda estacionária, com amplitude (aproximadamente) dupla da da onda incidente, e com um anti-nodo (para movimentos horizontais) situado a uma distância de $\lambda/4$ da placa 2. É precisamente neste anti-nodo que fica situada a placa 1, que assim fica sujeita a forças horizontais com a máxima amplitude, e realiza um movimento alternativo (em relação às outras duas placas) em torno duma articulação localizada na sua parte inferior. O movimento relativo entre placas é utilizado para accionar uma bomba (ou dispositivo equivalente).

— Uma versão da coluna de água oscilante, com turbina de ar reversível, em desenvolvimento na Queens University, Belfast. Trata-se duma boia, com forma de revolução e eixo vertical (Fig. 8), com uma câmara de ar, na parte superior da qual existe uma turbina de ar de tipo especial, inventada recentemente pelo Prof. Wells da mesma universidade. A turbina é do tipo axial e tem as pás, de perfil simétrico sem curvatura, situadas num plano perpendicular ao eixo de rotação (Fig. 9). A particularidade mais importante consiste em o binário e a velocidade de rotação terem o mesmo sentido qualquer que seja o sentido do fluxo de ar (ascendente ou descendente), como se conclui facilmente pela teoria clássica das turbomáquinas. Na fig. 9 (em baixo), **V** é a velocidade absoluta do ar (axial), **U** é a velocidade (circunferencial) das pás e $\mathbf{W}=\mathbf{V}-\mathbf{U}$ é a velocidade relativa do ar. Como é conhecido da aerodinâmica, a força (de sustentação) **L** exercida sobre cada pá é perpendicular a **W** e tem uma componente horizontal do mesmo sentido que **U**, quer o escoamento seja ascendente quer descendente. Esta força horizontal é responsável pelo binário útil. Esta turbina tem a vantagem importante de dispensar qualquer sistema de rectificação de válvulas e alcança uma veloci-

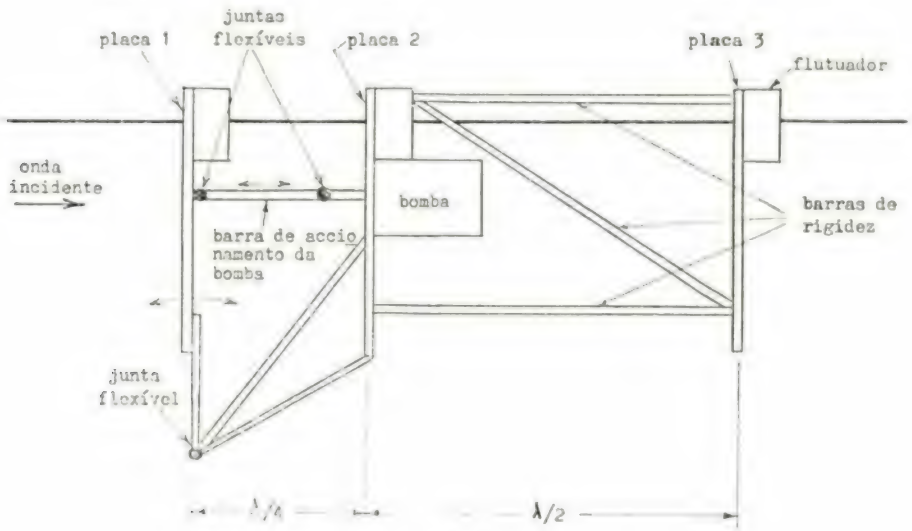


FIG. 7

Dispositivo de três placas

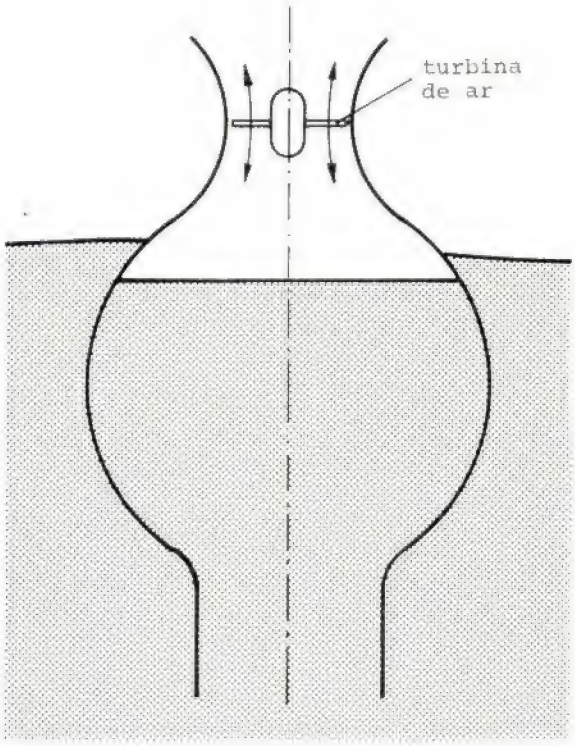


FIG. 8

Coluna de água oscilante com turbina de ar de fluxo reversível

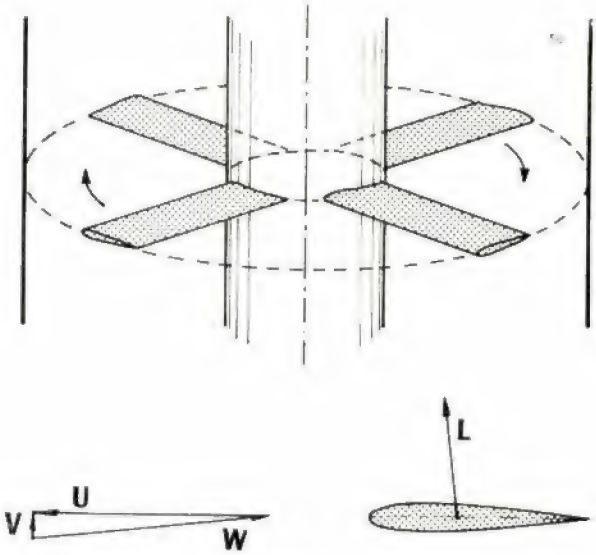


FIG. 9

Turbina de ar de fluxo reversível do tipo Wells

dade de rotação considerável (algumas centenas de r.p.m.) com velocidades de ar reduzidas (verifique-se que U é muito maior do que V). Um modelo de turbina Wells, ensaiado recentemente nos laboratórios do Central Electricity Generating Board, revelou rendimentos máximos da ordem de 85 %.

Novos inventos continuam frequentemente a ser apresentados à ETSU. Em virtude do trabalho já realizado e da experiência adquirida, é possível fazer uma boa apreciação das qualidades destes novos inventos. Esta tarefa é efectuada por um grupo de peritos especialmente constituído para este efeito. Este grupo está constantemente alerta para novas ideias, quer venham da indústria, das universidades ou de indivíduos. Para a avaliação dos custos de construção, a ETSU recorre frequentemente a consultores exteriores.

Reconhecendo que há muitas áreas de interesse comuns a todos os sistemas (ou a muitos deles), o Programa de Ondas da ETSU inclui actividade referente aos seguintes tópicos gerais:

— Dados referentes a ondas reais. A recolha, análise e interpretação dos dados acerca do clima de ondas em torno das Ilhas Britânicas estão a cargo do Institute of Oceanographic Sciences e do National Maritime Institute.

— Análise estrutural. O desenvolvimento de programas para a análise do comportamento estrutural em condições reais no mar está a ser efectuado pelo Loyds Register, British Ship Research Association e National Maritime Institute.

— Amarração. O National Engineering Laboratory (Glasgow), e vários fabricantes de cabos e órgãos de amarração, estão presentemente a efectuar ensaios de fadiga e corrosão em cabos e trabalho experimental em modelos reduzidos **[A.15]**.

— Geração e transmissão de energia. Todos os problemas de geração de energia eléctrica e sua transmissão, transformação e ligação à rede estão a ser estudados por um grupo de instituições (incluindo General Electric Co, Lucas, International Reseach & Development Co. Ltd, Pirelli), dirigido pelo Central Electricity Generating Board (vejam-se **[A.6, A.8** e **A. 10]**).

— Impacto sobre o ambiente. Têm vindo a ser efectuados estudos sobre o efeito dos dispositivos de extracção da energia das ondas sobre a ecologia costeira e marítima. Estes estudos são realizados mediante contratos com o Departamento de Agricultura e Pescas da Escócia, o Ministério da Agricultura, Alimentação e Pescas, e com o Nature Conservancy Council. Outras organizações, tais como o Highlands and Islands Development Board e a Scottish Marine Biological Research Association, estão envolvidas em estudos análogos.

Tem interesse referir aqui alguns números sobre a energia utilizável, apresentados no simpósio de Gotemburgo pelo Wave Programme Manager (ETSU), Clive Grove-Palmer (veja-se **[A.10]**). O valor de base são os 50 kW/m, referentes à potência média anual junto à costa ocidental da Escócia (veja-se atrás a secção 2). Como o rendimento dos dispositivos de captação de energia depende da direcção das ondas e como em condições reais a energia provém duma gama considerável de direcções, resulta que há uma perda devida a este efeito. Estima-se que o efeito de direccionalidade reduz a potência disponível a cerca de 65 % da potência incidente, ou seja a cerca de 32 kW/m. (Esta estimativa é necessariamente grosseira, pois o comportamento direccional está longe de ser o mesmo para

todos os dispositivos). O rendimento hidro-mecânico dos actuais dispositivos em condições de mar real é, em média, cerca de 50 % (excluídos os efeitos direccionais), reduzindo a potência a 16 kW/m. Admitindo perdas de 50 % na geração, transmissão e transformação de energia eléctrica, obtém-se o valor final de 8 kW/m para a potência anual média disponível na rede. Este valor refere-se aos dispositivos e tecnologia actuais e é provavelmente pessimista em termos de futuro.

O programa de energia dads ondas da ETSU para 1979-80 inclui a redução dos custos por unidade de energia produzida para os sistemas de primeira geração e a avaliação dos custos dos dispositivos de segunda geração, e ainda uma avaliação mais exacta dos recursos energéticos disponíveis e dos rendimentos de extracção.

Em relação ao médio prazo, espera-se que a primeira central, com uma potência de cerca de uma centena de MW, entre em funcionamento no final da década de oitenta (anunciado por C. Grove-Palmer na Conference on Power from Sea Waves, Edimburgo, Junho de 1979).

4.2 — Japão

Tal como o Reino-Unido, o Japão é um país altamente industrializado, constituído por várias ilhas e dispondo de elevada potencialidade no que respeita à energia das ondas. Também aqui foram dispendidas verbas consideráveis para o aproveitamento deste tipo de energia. Porém, ao contrário da política seguida no Reino-Unido, o desenvolvimento no Japão incidiu fundamentalmente num único projecto, ligado desde a sua origem a Yoshio Masuda, do Centro Japonês de Ciência e Tecnologia Marítimas (JAMSTEC), de Yokosuga. Masuda começou por estudar e desenvolver pequenas boias, com um dispositivo de geração de energia eléctrica para alimentação do sistema de sinalização. O princípio de funcionamento é o da coluna de água oscilante, com uma câmara de ar e uma turbina de ar accionando um gerador. A potência gerada é de cerca de 80 W, tendo sido construídas mais de 600 unidades para a Marinha Japonesa.

Em 1974, o JAMSTEC iniciou o desenvolvimento dum dispositivo para o aproveitamento de energia em muito maior escala, utilizando o mesmo princípio de funcionamento.

Depois de dois anos de ensaios em tanque de ondas, foi decidido que o dispositivo seria constituído fundamentalmente por uma plataforma flutuante rectangular, com a forma de casco de navio, ficando disposta paralelamente à direcção predominante de propagação das ondas. Esta disposição foi considerada como facilitando os problemas de amarração e possibilitando um bom aproveitamento de energia. Em 1976 foi iniciada (pela firma IHI Aioi) a construção dum protótipo, a que foi dado o nome de *Kaimei*, e em 1977 foram construídos (pela firma Fuji Electric Co.) três grupos, constituídos cada um por uma turbina de ar e um gerador eléctrico. Os primeiros testes, em condições reais, foram efectuados no Mar do Japão, junto a Yura, entre Julho de 1978 e Abril de 1979.

O *Kaimei* tem, em planta, uma forma aproximadamente rectangular, com 80 m de comprimento e 12 m de largura (Fig. 10). No casco existem 11 câmaras de ar duplas, abertas inferiormente para o mar, e que, pela parte superior, podem comunicar com uma turbina de ar (uma turbina para cada câmara dupla) (Fig. 11). O princípio de funcionamento, nas suas linhas gerais, é idêntico ao que foi descrito atrás a propósito do dispositivo de coluna de água oscilante do NEL. (No caso do *Kaimei*, a associação de câmaras corresponde à disposição designada por attenuator; veja-se § 4.1.) As turbinas inicialmente utilizadas são do tipo axial de reacção clássico (não muito diferentes do que se encontra frequentemente em turbinas de vapor e gás), com um sistema de rectificação por válvulas de modo a que o fluxo de ar atravessa a tubrbina sempre no mesmo sentido. Durante os ensaios no mar, as potências produzidas por cada grupo gerador variaram entre cerca de 30 e 70 kW, conforme o estado do mar (com um máximo de 260 kW). O *Kaimei*, com os seus 80 m de comprimento, foi projectado para conseguir o má-

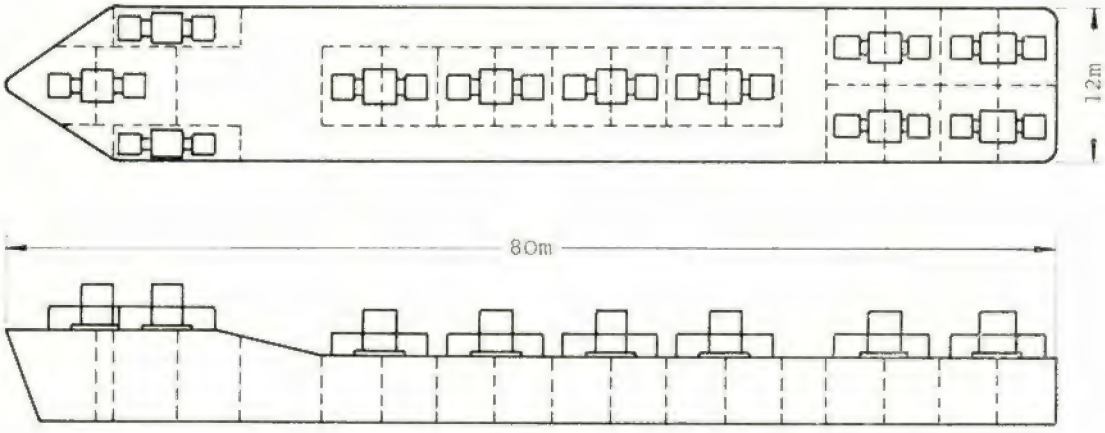


FIG. 10

«Kaimei»

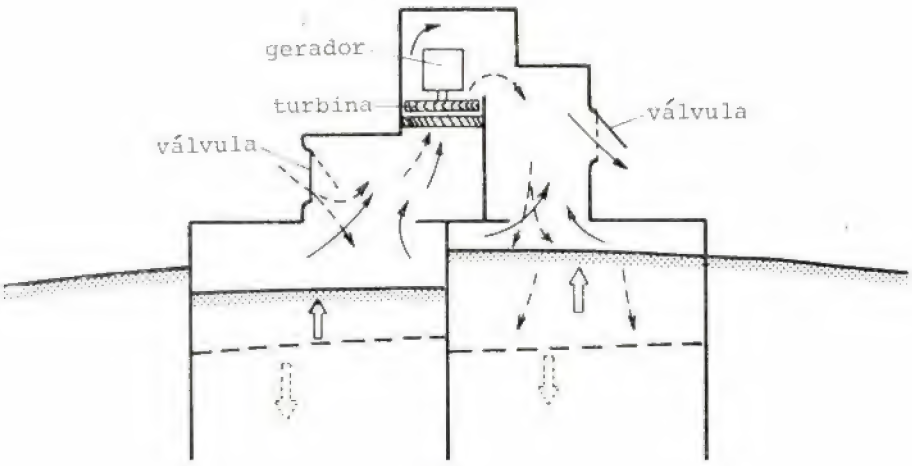


FIG. 11

Sistema de válvulas das turbinas inicialmente montadas no Kaimei

ximo rendimento em ondas com comprimento de cerca de 60 m (períodos da ordem de 6 s). De facto, os ensaios foram efectuados num golfo, em que as ondas são produzidas localmente pelo vento. Para maiores comprimentos de onda (tais como os que caracterizam as maiores densidades de fluxo de energia no Atlântico Norte, e que correspondem à acção do vento em grandes áreas do oceano), seria necessário um comprimento de plataforma proporcionalmente maior para se conseguir idêntico rendimento. Para mais pormenores, consultar **[A.18]**.

Em fins de 1977, o governo japonês, por intermédio da Agência Internacional de Energia, convidou os países membros a participarem no seu programa de aproveitamento da energia das ondas. Os países interessados poderiam construir grupos turbo-geradorese que seriam instalados e ensaiados no *Kaimei* (na altura em fase final de construção). O Reino-Unido, os E. U. A., o Canadá e, posteriormente, a Irlanda, aceitaram o convite (estando o Canadá apenas interessado na aquisição de dados). A turbina britânica, recentemente construída, é do tipo axial clássico (reacção), com um sistema de rectificação do escoamento por válvulas (Fig. 12). A turbina americana (da qual temos apenas vagas informações) é, pelo contrário, de fluxo reversível, com duas coroas de pás (axiais) móveis contra-rotativas.

Depois do seu primeiro ano de ensaios no mar em 1978-79, o *Kaimei* recolheu ao estaleiro, onde lhe estão sendo instalados novos grupos turbo-geradores, incluindo os grupos britânico e americano, devendo a potência total instalada aumentar para cerca de 1 MW.

Tem interesse referir que, na sua comunicação ao simpósio de Gotemburgo, Y. Masuda mostrou-se par-

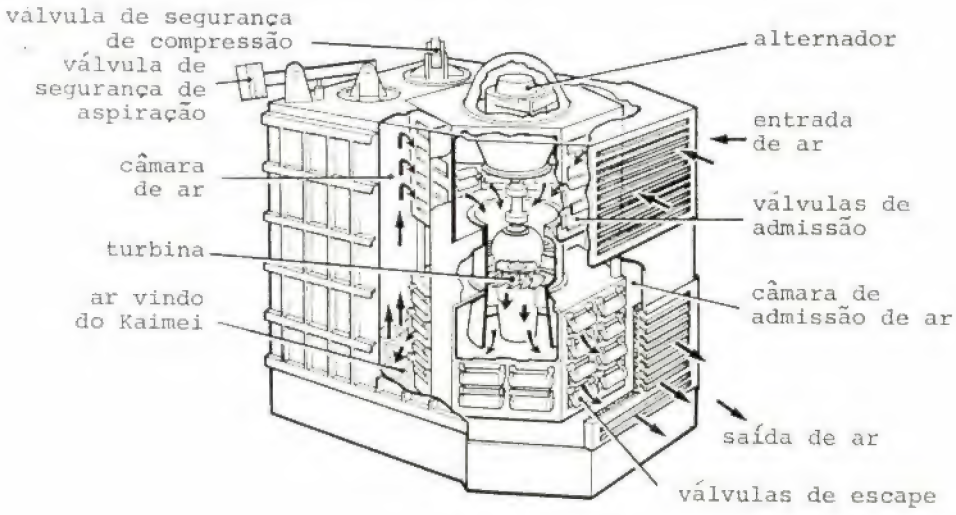


FIG. 12

Grupo turbo-gerador britânico para instalação no **Kaimei**

ticularmente desejoso de estudar as possibilidades de utilização das recentes turbinas do tipo Wells (a que nos referimos atrás), que poderiam resolver o problema da conversão de energia duma forma mais satisfatória.

4.3 — Noruega

A Noruega, com uma extensa costa virada ao Atlântico, é evidentemente um dos países da Europa com mais abundantes recursos naturais no que se refere à energia das ondas. A energia média anual por metro de costa é provavelmente um pouco inferior à da costa ocidental das Ilhas Britânicas (30 kW/m?), em virtude da *obstrução* parcial devida à presença das Ilhas Britânicas e da Islândia.

Tanto quanto é do nosso conhecimento, o programa de desenvolvimento do aproveitamento da energia das ondas na Noruega incide fundamentalmente sobre dois projectos, aliás profundamente diferentes entre si:

— Focagem das ondas, em desenvolvimento no Instituto Central de Investigação Industrial (Oslo), desde 1971. Este método, muito diferente de qualquer outro do nosso conhecimento, consiste em concentrar, numa área reduzida (normalmente junto à costa), a energia transportada numa frente relativamente extensa (vários quilómetros). O princípio de funcionamento é análogo ao da concentração dos raios luminosos que atravessam uma lente de vidro. Uma onda luminosa plana, ao passar através duma lente adequada, transforma-se numa onda esférica que converge no foco da lente. Como é bem conhecido, esta modificação é devida ao facto de a velocidade de propagação da luz ser menor no vidro do que no ar, e ainda em virtude da espessura variável da lente. O mesmo princípio pode ser aplicado às ondas na superfície da água. Neste caso, é necessário que as ondas atravessem uma zona onde a sua velocidade de propagação seja alterada (reduzida). Como referimos atrás (§ 1), a celeridade depende da distância h a que o fundo está da superfície livre, diminuindo a velocidade com a diminuição de h. Um processo de refractar as ondas (de modo a concentrá-las) seria modificar adequadamente a forma do fundo. Um processo equivalente, mas mais viável, consiste em colocar uma série de placas horizontais em locais e profundidades apropriados (Fig. 13). Considerações e cálculos preliminares indicam para a profundidade valores da ordem dos 30 m. A energia é então extraída mais facilmente na zona focal, onde a amplitude das ondas sofre um considerável aumento (são de esperar amplitudes da ordem de 15 a 30 m). Um método proposto para este efeito consiste em fazer coincidir a zona focal com uma falésia (comum na costa norueguesa), na qual é construída uma conduta em forma de chaminé convergente, onde a água é forçada a penetrar e a subir até um reservatório sobreelevado cujo nível pode atingir 100 m. No caso da costa não se prestar a este tipo de solução, poderão ser utilizados outros métodos.

A focagem das ondas, e a disposição mais adequada das placas e o seu efeito foram objecto de estudos teóricos (utilizando a integração numérica das equações do escoamento com as condições de fronteira

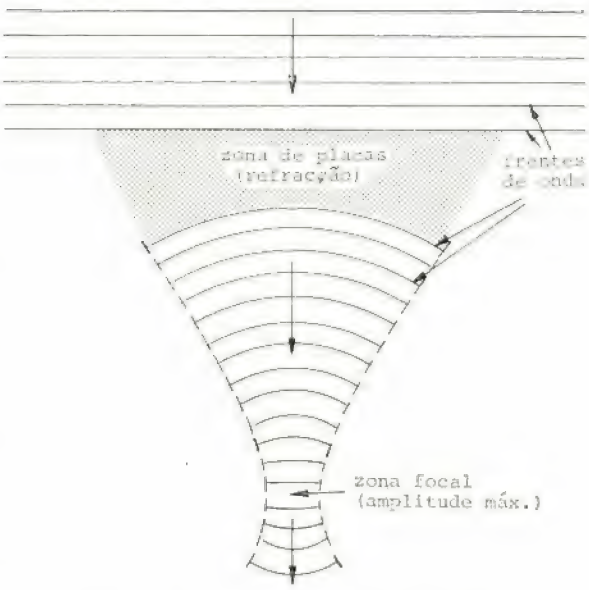


FIG. 13

Focagem das ondas utilizando placas submersas

adequadas) e de estudos experimentais em tanques de ondas. A fim de possibilitar a realização de ensaios em maior escala, foi recentemente construído um tanque com as dimensões de 150x100 m, em que se podem efectuar medições de pressão junto ao fundo com o auxílio dum mecanismo de atravessamento. A fim de se estudar o grau de eficiência do método de focagem no caso em que as ondas incidentes não são unidireccionais, nos primeiros ensaios (de que foi projectado um filme no simpósio de Gotemburgo) as ondas foram geradas num ponto do tanque. Verificou-se que, por acção dum sistema de placas horizontais, submersas a profundidades de 10 a 15 cm, é possível focar as ondas numa área relativamente pequena do tanque, onde se verifica um grande aumento de amplitude. Para mais informações, consultar **[A.2]**.

— Dispositivos de absorção pontual (*point absorbers*), em desenvolvimento na Universidade Técnica de Trondheim. Trata-se de flutuadores, com forma cilíndrica circular de eixo vertical, que podem realizar um movimento oscilatório vertical (Fig. 14). O flutuador está fixado ao fundo por um cabo elástico, por intermédio do qual é extraída a energia. (No caso dos ensaios em tanque ou canal de ondas, o flutuador é suspenso). Para ondas sinusoidais regulares, a teoria linear mostra que um flutuador isolado (mesmo de pequenas dimensões em relação a λ) pode, em condições de ressonância, extrair uma potência igual ao fluxo de energia transportado pelas ondas incidentes numa frente de comprimento $\lambda/2\pi$ (medido paralelamente à crista das ondas) ou seja uma potência igual a $(\lambda/2\pi)P$, sendo P a quantidade definida no § 1. No caso duma série regular (infinita) de boias alinhadas paralelamente à crista das ondas, o rendimento teórico, com ondas sinusoidais e condições de ressonância, é de 50 %, mas pode atingir 100 % se for colocado um

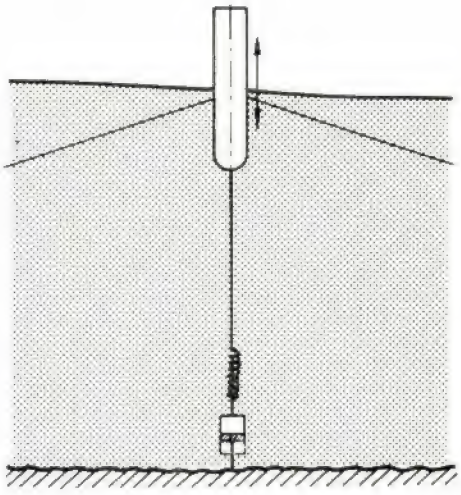


FIG. 14

Dispositivo de absorção pontual (esquemático)

sistema de reflexão atrás da fila de boias. Este reflector pode ser uma parede vertical (reflector estático) ou uma segunda linha de boias (reflector dinâmico). Foram efectuados estudos teóricos e experimentais pormenorizados sobre o comportamento das boias, isoladas ou em série.

Note-se que, embora à luz da teoria linear o rendimento seja independente da dimensão da boia (desde que as ondas incidentes sejam sinusoidais e se esteja em condições de ressonância), a curva (teórica e experimental) do rendimento duma boia (ou sistema de boias) em função do comprimento de onda (no caso de λ variável) mostra um pico tanto mais estreito quanto menor for o diâmetro da boia em relação ao comprimento de onda de ressonância. Veja-se o que dissemos atrás, no § 3.1.

Está também em estudo um método para melhorar o rendimento das boias em ondas irregulares (condições reais). Como é evidente, apenas é possível, em cada instante, extrair energia se a força exercida pela água sobre a boia e a sua velocidade tiverem o mesmo sentido, o que nem sempre sucede ao longo do tempo. Note-se que, durante os intervalos de tempo em que os sentidos forem contrários, a boia está a fornecer energia à água. O método consiste em utilizar um controlo por computador que possa imobilizar a boia (actuando sobre o cabo de fixação) e apenas a deixe mover quando a força e a velocidade tiverem o mesmo sentido.

O dispositivo de absorção pontual foi objecto duma comunicação [**A.13**] ao simpósio de Gotemburgo.

4.4 — Suécia

O estudo do aproveitamento da energia das ondas na Suécia foi iniciado em 1976, na Chalmers Tekniska Hogskola (Universidade Técnica Chalmers, CTH), Gotemburgo, pela Comissão Nacional Sueca para o Desenvolvimento das Fontes de Energia (NE). As verbas dispendidas até meados de 1979 totalizaram 4,5 milhões de coroas (cerca de 56 mil contos ao câmbio de Outubro de 1979).

O grupo de investigação em energia das ondas da CTH inclui três professores (Hidrodinâmica Naval, Hidrodinâmica Marítima, Máquinas Eléctricas) e quinze outros engenheiros e cientistas (ligados a vários departamentos da universidade).

A finalidade do programa é investigar até que ponto a energia das ondas pode contribuir para o abastecimento energético do país. No programa estão incluídas a avaliação da energia disponível ao longo da costa sueca e do custo unitário de energia produzida com vários dispositivos, e ainda a determinação dos locais mais adequados para a instalação de eventuais centrais. As conclusões de estudos preliminares apontam favoravelmente para a utilização da energia das ondas. No entanto reconhece-se que são escassos os dados actuais sobre o clima de ondas e a energia disponível junto à costa sueca, e que é necessário um estudo mais completo sobre o comportamento dos vários dispositivos em condições de mar real. De acordo com as estimativas actuais, os locais com maiores potencialidades energéticas são a costa ocidental, com valores médios anuais da ordem de 10 kW/m, e a zona do Báltico junto à ilha de Gotland (ao sul de Estocolmo), com cerca de 6 kW/m. (Estes valores são consideravelmente inferiores aos que se verificam nas costas ocidentais das Ilhas Britânicas e, presumivelmente, junto à costa portuguesa). Cálculos aproximados indicam que a energia total disponível em toda a costa sueca é de cerca de 40 a 60 TWh/ano, dos quais se estima que cerca de 5 TWh/ano possam ser utilizados. Este valor deve ser comparado com o consumo anual de energia eléctrica na Suécia: 90 TWh/ano (1978).

No que respeita ao desenvolvimento de dispositivos de extracção de energia, a actividade tem-se concentrado fundamentalmente nos flutuadores de absorção pontual (semelhantes aos que foram referidos a propósito da Noruega). Inicialmente, este tipo de dispositivo foi adoptado apenas como exemplo de estudo, por a análise teórica e experimental do seu comportamento ser relativamente simples. Posteriormente, depois das primeiras investigações, foram reconhecidas notáveis vantagens neste tipo de sistema e foi decidido prosseguir e ampliar o seu estudo e desenvolvimento. Os primeiros ensaios em laboratório foram efectuados com pequenos modelos em tanque de ondas. Posteriormente, no Verão de 1978, foram iniciados ensaios com modelos maiores (diâmetro de cerca de 0,7 m), em condições mais próximas das reais, no lago Lygnern, perto de Gotemburgo. O lago tem 20 km de comprimento, 2 a 3 km de largura, e profundidades que atingem 50 m. As ondas geradas pelo vento no lago têm comprimentos típicos de 10 m, com amplitudes que atingem 1 m.

Dois dispositivos em estudo para a extracção de energia útil a partir do movimento oscilatório vertical da boia estão representados na Fig. 15. Em a), é utili-

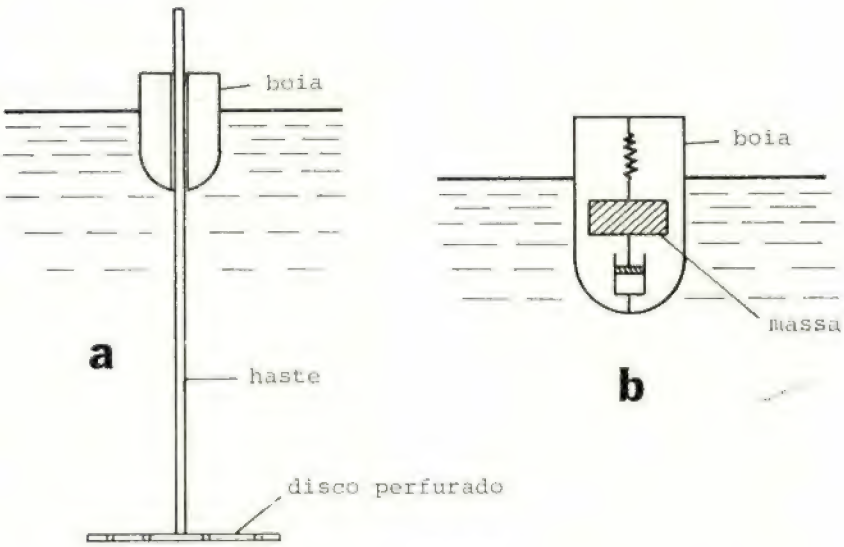


FIG. 15

Sistemas de extracção de energia da boia: (a) com um disco profundamente submerso; (b) com uma massa de inércia no interior da boia

zado o movimento relativo entre a boia e um disco perfurado (ligado a uma haste) situado a uma profundidade suficiente para ser pouco afectado pelas ondas de superfície. O disco funciona como sistema de inércia (estando a maior parte da inércia ligada à massa de água que o disco arrasta consigo no seu movimento vertical). No sistema representado esquematicamente em b), o dispositivo de inércia, de referência, é constituído por uma massa situada no interior da boia, com uma suspensão elástica. Neste caso a frequência própria das oscilações livres da massa de inércia (com a boia fixa) deve ser suficientemente diferente (inferior) das frequências típicas das ondas (e portanto do movimento da boia). Na representação esquemática da figura, o clássico cilíndrico com êmbolo representa um gerador eléctrico.

A aplicação deste tipo de flutuadores, com oscilações verticais, sugere a utilização de geradores eléctricos lineares, isto é em que, em vez de movimento rotativo, a parte móvel tem um movimento rectilíneo alternativo. Em comparação com um gerador rotativo clássico, uma máquina linear tem a vantagem de poder ser aplicada directamente sem um sistema intermédio de transmissão mecânico ou hidráulico. (Note-se que estão em jogo movimentos lentos mas as forças podem ser muito elevadas). Os seus inconvenientes são as suas maiores dimensões e custo mais elevado, além de estar tecnologicamente menos desenvolvido. A CTH tem em curso um projecto de investigação para o estudo e desenvolvimento de geradores lineares para este fim.

Tem interesse citar aqui algumas estimativas de custos apresentadas no simpósio de Gotemburgo **[A.12]**, referentes a uma central a instalar no Báltico, a sul da ilha de Gotland. A central seria constituída por 720 boias, alinhadas ao longo dum comprimento de 1,5 km, e deveria produzir cerca de 35 GWh/ano com uma potência nominal de cerca de 10 MW. O custo do investimento é estimado em 60 milhões de coroas (720 mil contos). Admitindo uma duração de vida de 25 anos, um juro de 10 % por ano e um custo de manutenção igual a 5 % do investimento total, o custo unitário resultante para a energia produzida seria de 0,27 coroas/kWh (3,2 escudos/kWh). A decomposição do montante do investimento seria a seguinte:

dispositivos de amarração	8 %
boias	22 %
cabos eléctricos	10 %
geradores	56 %
equipamento electrónico	4 %

Está também em estudo na CTH um outro dispositivo para transformação do movimento da boia em energia útil. Trata-se duma bomba de tipo especial, constituída por um tubo de borracha, envolvido por tiras enroladas segundo um certo ângulo. Quando o tubo é distendido, o seu volume diminui, dando origem a uma acção de bombagem. Este tipo de boia pode ser usado como ligação da boia a um ponto fixo no fundo do mar.

Espera-se que nos próximos dois anos o governo sueco mantenha o mesmo nível de subsídio ao programa de aproveitamento da energia das ondas (2,25 milhões de coroas por ano), tal como foi recomendado pela NE. Deverá prosseguir a recolha de dados sobre a ondulação junto à costa sueca (veja-se **[A.16]**) e continuará o trabalho de avaliação do clima de ondas a partir do conhecimento do campo de pressão atmosférica **[A.17]**. Serão também abordados os problemas técnicos, económicos e ecológicos resultantes do aproveitamento da energia das ondas. Deverão ser efectuados estudos experimentais sobre o comportamento dos

dispositivos de absorção pontual em ondas irregulares, tanto em laboratório como no lago Lygnern. Serão igualmente estudados diversos sistemas de amarração e será investigada a possibilidade de melhorar o rendimento hidro-mecânico actuando sobre o amortecimento exterior. Deverá ser construído um gerador linear de 1 kW, que será instalado numa boia e testado juntamente com o restante equipamento eléctrico. Grande parte de toda esta investigação experimental será acompanhada do correspondente desenvolvimento teórico.

Tem também interesse salientar que o aproveitamento da energia das ondas continua a ser tema para trabalho de investigação de pós-graduação na CTH, tendo sido já iniciados oito trabalhos deste tipo.

Para mais informações sobre o programa sueco, consultar [**A.12**].

4.5 — Estados Unidos

Não temos conhecimento de qualquer acção coordenada a nível nacional nos E. U. A. no campo do aproveitamento da energia das ondas, embora apareçam com certa frequência trabalhos publicados de origem americana sobre este assunto.

Há que mencionar alguns trabalhos de grande importância, especialmente teóricos, realizados no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Em particular salientamos vários artigos teóricos, dos Profs. J. N. Newman e C. C. Mei, do MIT, que estabelecem bases matemáticas para o estudo duma larga gama de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas. Alguns destes trabalhos foram conduzidos em ligação com cientistas britânicos e incidem sobre o estudo de dispositivos em desenvolvimento no Reino-Unido. É de notar que a primeira comunicação apresentada no simpósio de Gotemburgo é precisamente da autoria dos dois professores referidos.

Uma segunda comunicação proveniente dos E. U. A. [**A.11**] foi apresentada ao simpósio pelo Prof. J. D. Isaacs, da Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, Califórnia, e nela se descrevem dois dispositivos de aproveitamento da energia das ondas. O primeiro, desenovlvido pela Foundation for Ocean Research, de San Diego, é constituído fundamentalmente por uma plataforma flutuante, à qual está ligado um tubo rígido de grande comprimento que mergulha verticalmente no mar. O tubo é aberto inferiormente e, superiormente, comunica com um reservatório sob pressão por intermédio duma válvula. O funcionamento do sistema baseia-se na interacção não ressonante entre o movimento da plataforma e a inércia da água contida no tubo. A plataforma tende a seguir as deslocações da superfície do mar, ficando sujeita a uma aceleração vertical, variável em módulo e em sentido.

Se a válvula estiver permanentemente fechada, a água contida no tubo é obrigada a seguir os movimentos da plataforma, ficando sujeita às mesmas acelerações. Como é fácil verificar, a pressão instantânea na água na parte superior do tubo varia linearmente com a aceleração, sendo o coeficiente de variação proporcional ao comprimento do tubo. Quando o sistema está em funcionamento, a válvula é comandada de tal modo que permanece aberta apenas quando a pressão da água na parte superior do tubo é maior do que um determinado valor. Durante estes intervalos de tempo a água penetra no reservatório, sendo impedida de retroceder pela válvula quando a pressão no tubo volta a descer. A energia potencial da água pressurizada no reservatório pode ser utilizada por intermédio duma turbina hidráulica tipo Pelton (ou de outro modo). Um modelo deste sistema foi ensaiado junto à costa da Califórnia e junto ao arquipélago Hawai, tendo funcionado durante vários meses. Com um comprimento de tubo de 90 m e ondas com cerca de 2,5 m de amplitude, obtêm-se pressões de cerca de 5 atm.

O segundo dispositivo (Fig. 16), da Lockeed Co., *dam-atoll*, tem a forma duma calote esférica com a

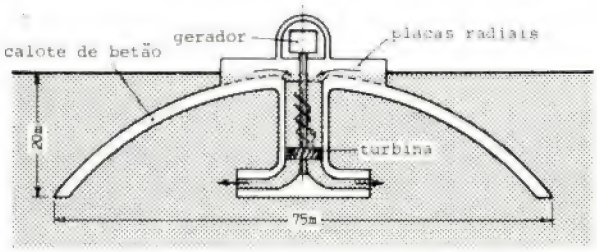


FIG. 16

Dam-atoll

concavidade para baixo (diâmetro da base cerca de 75 m). O sistema é flutuante, estando a calote quase totalmente subersa. As ondas que se aproximam do dispositivo tendem a formar um vórtice, por acção duma série de placas verticais colocadas radialmente, e a rebentar junto à parte central da calote, como resultado da diminuição de profundidade que encontram quando se aproximam do centro. A água em rotação penetra num poço colocado no eixo da calote e acciona uma turbina de eixo vertical, saindo pela parte inferior.

4.6 — Outros países

Não temos conhecimento de que em qualquer outro país exista actividade, no campo da utilização da energia das ondas, com amplitude comparável à da que decorre nos cinco países atrás referidos. Faremos apenas breves referências ao interesse que o assunto tem despertado em vários países e a algumas iniciativas que daí resultaram.

Mencionamos primeiramente o sistema proposto pelo Dr. Eng. Rolf Törnkvist, de Helsínquia, que resulta da sua experiência como projectista de geradores de ondas irregulares, do tipo clássico usado por exemplo no LNEC, mas utilizado em sentido inverso, isto é extraindo energia das ondas. O movimento (irregular) da placa ou batedor é controlado por computador a partir de dados sobre as ondas incidentes fornecidos por um ou vários sensores situados à frente da placa. Para mais informações, consultar [**A.22**].

A firma italiana Tecnomare S.P.A., de Veneza, com o apoio do C. N. R. (Conselho Nacional de Investigação), tem em curso um programa de investigação e desenvolvimento incidindo sobre os seguintes pontos [A.23]:

— Elaboração dum programa de computador que, a partir de registos recolhidos no mar, forneça resultados sobre o conteúdo energético das ondas e outras indicações necessárias ao estudo do aproveitamento dessa energia.

— Estudo (teórico) dos dispositivos de absorção pontual (já referidos atrás).

— Aspectos económicos da utilização da energia das ondas.

Na República Federal Alemã, há a referir vários sistemas concebidos pelo Dr. Eng. H. Kayser [A.20], que no entanto não tem encontrado apoio para o seu desenvolvimento, possivelmente por falta de interesse das autoridades alemãs na energia das ondas, e também (na nossa opinião) em virtude dum certo amadorismo da parte do inventor.

Embora em Gotemburgo estivessem presentes três participantes franceses, fomos informados de que não está em curso qualquer programa de investigação ou desenvolvimento da utilização da energia das ondas em França. Os responsáveis pelo sector energético francês mantêm-se porém interessados no assunto e procuram continuar informados sobre o que neste campo se passa no estrangeiro. (A França tem enviado regularmente representantes a reuniões em que estes problemas são tratados).

Finalmente podemos referir que este assunto, em Espanha, está a ser estudado na Universidade de Santander, tendo sido recentemente iniciado um trabalho de doutoramento neste campo sob a direcção do Prof. M. A. Losada, do Departamento de Portos e Obras Marítimas.

5 — PORTUGAL: SITUAÇÃO ACTUAL E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

Portugal é certamente um dos países da Europa potencialmente mais ricos em energia de ondas por habitante, e mesmo em absoluto. Tanto quanto é do nosso conhecimento, não há valores seguros sobre a energia disponível junto à costa portuguesa, mas é de presumir que não ande longe do valor médio anual por unidade de comprimento correntemente aceite para a costa ocidental das Ilhas Britânicas: 50 kW/m. Se adoptarmos a estimativa revelada pelo responsável pelo programa de energia das ondas britânico (§ 4.1) de 3 kW/m para a potência eléctrica colocada na rede, e se multiplicarmos este número pelos 500 km de comprimento da costa ocidental portuguesa, obtemos a potência total de 4000 MW (média anual) colocada na rede eléctrica. Este valor, que não inclui os arquipélagos da Madeira e dos Açores, mostra que a energia das ondas pode constituir uma contribuição muito substancial para o abastecimento energético nacional.

Evidentemente a quantidade de energia utilizável não é o único factor fundamental a ter em conta. O preço de custo da energia produzida é igualmente importante. Como se poderá concluir do que foi escrito neste relatório, não é ainda possível conhecer, com um razoável grau de certeza, qual seria o custo da energia produzida por uma central de ondas de qualquer dos tipos actualmente em desenvolvimento se fosse construída num futuro próximo. O programa britânico — provavelmente o mais digno de confiança neste e noutros aspectos — indica que os custos estimados têm vindo a baixar rapidamente nos últimos dois ou três anos, em virtude dos progressos conseguidos no estudo e desenvolvimento de vários dispositivos e ao aparecimento de outros mais promissores, tudo levando a crer que essa tendência para redução do custo unitário de energia se mantenha num futuro próximo, embora não necessariamente com o mesmo ritmo. Por esta razão, é de esperar que o preço de cerca de 10 pence/kWh (ou um pouco menos), dado pelas estimativas britânicas em meados de 1979, baixa apreciavelmente nos próximos anos, podendo tornar-se competitivo a médio prazo, particularmente se o preço do petróleo continuar a subir rapidamente e se houver obstáculos à construção de centrais nucleares (de natureza política ou outra). É notável que seja precisamente no Reino-Unido que se dedique maior esforço de desenvolvimento à utilização da energia das ondas, se considerarmos que se trata do único país ocidental industrializado que é auto-suficiente em petróleo e onde simultaneamente está em curso um ambicioso programa de construção de centrais nucleares.

É conveniente chamar a atenção para o facto de que a grande densidade de energia das ondas, que caracteriza o Atlântico Norte em contraste com o Báltico e o Mediterrâneo, não implica necessariamente preços unitários de energia mais baixos. Tal como é salientado pelos suecos e italianos, menores conteúdos energéticos correspondem a menores comprimentos de onda e amplitudes, e portanto a menores dimensões dos dispositivos de extracção de energia (incluindo equipamento eléctrico), que além disso não terão que resistir a condições de mar tão adversas em caso de tempestade.

Apesar das condições naturais particularmente favoráveis no que respeita à energia das ondas em Portugal, muito pouco se tem feito neste campo até agora no nosso país. Salientamos primeiramente o esforço e persistência do inventor Agnelo David, que desde há meia dezena de anos tem procurado desenvolver o seu dispositivo, basicamente idêntico ao sistema de coluna de água oscilante do NEL (Glasgow) e ao do japonês Masuda. O dispositivo de Agnelo David, na sua versão original, utiliza uma turbina de ar de fluxo reversível, que, devido à disposição desfavorável das pás inerente à sua concepção, julgamos conduzir a rendimentos excessivamente baixos.

No que respeita a estudos mais fundamentados, referimos alguns artigos publicados na nossa imprensa nos últimos anos pelo Prof. J. J. Delgado Domingos, do Instituto Superior Técnico, em que se procurou chamar a atenção para este campo. No entanto, julgamos que o único trabalho de investigação em bases rigoro-

sas até agora feito no nosso país é o que está em curso no Centro de Termodinâmica Aplicada e Mecânica dos Fluidos da Universidade Técnica de Lisboa, e de que os primeiros resultados teóricos foram publicados recentemente [10] sob a forma duma comunicação ao Segundo Congresso Nacional de Mecânica Teórica e Aplicada. Este trabalho, que teve a sua motivação inicial no dispositivo de Agnelo David, incide sobre o sistema de coluna de água oscilante, a que fizemos várias vezes referência.

O programa nacional de desenvolvimento da utilização da energia das ondas irá enfrentar problemas multi-disciplinares e terá consequentemente que envolver a colaboração de várias instituições e personalidades. Deverá, além disso, ter uma dimensão mínima, em verbas e pessoas, sem o que não serão minimamente atingidos os objectivos propostos, a não ser eventualmente a produção de trabalho academicamente valioso. Parece-nos que, numa fase inicial, a actividade deverá incidir prioritariamente sobre os seguintes dois pontos:

— Estudo das características energéticas das ondas junto à costa portuguesa, quer a partir de registos existentes quer envolvendo novas medições no mar. Pensamos que esta tarefa poderá ser efectuada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo Instituto Hidrográfico e pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

— Estudo da conversão da energia das ondas em energia mecânica, com uma parte de análise teórica e uma componente experimental. Dada a relativa exiguidade de recursos do país, em verbas, equipamento laboratorial e pessoal cientificamente qualificado, é necessário, pelo menos numa fase inicial, optar pelo estudo e desenvolvimento de apenas um ou dois tipos de dispositivos, embora seja absolutamente fundamental que se mantenha permanentemente actualizado o conhecimento do que neste campo se faz noutros países. Como existem já alguns estudos feitos no nosso país sobre o sistema de coluna de água oscilante, parece razoável prosseguir nesses estudos, até à data puramente teórica, passando inclusivamente à experimentação em laboratório. Nesta fase inicial, a escolha do dispositivo a estudar, desde que minimamente criteriosa, é relativamente secundária, uma vez que o primeiro objectivo a atingir é um domínio mais perfeito das técnicas teóricas e experimentais, e dos problemas que se põem, todos eles mais ou menos comuns a uma vasta gama de dispositivos. Além disso, não é ainda hoje claro qual o tipo de dispositivo hidro-mecânico que reúne maiores vantagens técnico-económicas e qual o que virá a ser adoptado no futuro. Note-se que os conhecimentos e experiência que vão sendo adquiridos neste período preliminar são preciosos para o prosseguimento do programa, quer se decida prosseguir o estudo dos dispositivos primeiramente escolhidos ou se reconheça ser preferível seguir outros processos. Pelo menos nesta fase inicial, parece-nos que a actividade deve ser efectuada num centro universitário, à semelhança do que tem sucedido noutros países. A ser assim, é o Centro de Termodinâmica Aplicada e Mecânica dos Fluidos da Universidade Técnica de Lisboa que reúne as melhores condições, especialmente se for possível contar com a colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil na parte experimental. Não queremos também deixar de salientar que é importante que haja permanentemente um espírito de abertura para novas ideias, venham elas donde vierem. Em particular, deve haver suficiente disponibilidade de equipamento experimental para que tais ideias possam ser testadas (mesmo a nível muito preliminar), desde que se afigurem minimamente promissoras.

Para além destes dois pontos, que consideramos cronologicamente prioritários, outros há, que deles dependem em larga medida, e que terão igualmente que ser abordados e desenvolvidos. Em particular referimos os seguintes:

— Estudo dos problemas referentes à geração, transporte e transformação de energia eléctrica e sua ligação à rede. Do mesmo modo que no Reino-Unido o estudo deste assunto é coordenado pelo Central Electricity Generating Board, parece-nos razoável que nosso país tal coordenação caiba à empresa Electricidade de Portugal.

— Implicações no ambiente costeiro e marítimo resultantes da eventual construção de centrais de aproveitamento da energia das ondas.

Para além destes aspectos parciais do problema, terá evidentemente que existir uma entidade que se responsabilize pelo programa, coordene os vários esforços e centralize os resultados obtidos. Em particular, tal entidade deverá ser responsável pelo estudo económico global do problema.

REFERÊNCIAS

[1] **B. Le Méhauté** — *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Springer-Verlag, Berlin, 1976.

[2] **J. Lighthill** — *Waves in Fluids*, Cambridge University Press, 1978.

[3] **D. V. Evans** — *A theory for wave-power absorption by oscillating bodies*, J. Fluid Mech., vol. 77, pp. 1-25 (1976).

[4] **D. V. Evans** — *The oscillating water column wave-energy device*, J. Inst. Math. Appl., vol. 22, pp. 423-433 (1978).

[5] **A. E. Mynett, D. D. Serman, C. C. Mei** — *Characteristics of Salter's cam for extracting energy from ocean waves*, Appl. Ocean Res., vol. 1, pp. 13-20.

[6] **J. Lighthill** — *Two-dimensional analyses related to wave-energy extraction by submerged resonant ducts*, J. Fluid Mech., vol. 91, pp. 253-317 (1979).

[7] **G. F. Knott, J. O. Flower** — *Wave-tank experiments on an immersed paralel-plate duct* J. Fluid Mech., vol. 90, pp. 327-336 (1979).

[8] **D. V. Evans, D. C. Jeffrey, S. H. Salter, J. R. M. Taylor** — *Submerged cylinder wave-energy device: theory and experiment*, Appl. Ocean Res., vol. 1, pp. 3-12 (1979).

[9] **T. Fuwa** — *Wave generation and absorption by means of completely submerged horizontal circular cylinder moving in a circular orbit — Fundamental study on wave energy extraction*, Papers of Ship Res. Inst., Tokyo, N.º 53, Oct. 1978.

[10] **A. J. N. A. Sarmento, A. F. de O. Falcão** — *Aproveitamento da energia das ondas marítimas por um sistema pneumático — Estudo teórico*, comunicação apresentada no Segundo Congresso Nacional de Mecânica Teórica e Aplicada, Lisboa, Outubro de 1979. Aguardando publicação na Técnica.

As referências seguintes são comunicações apresentadas no **Symposium on Wave Energy Utilization**, realizado na Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, de 29 de Outubro a 1 de Novembro de 1979.

[A.1] *Wave-Power Extraction by Floating Bodies.*
Prof. C. C. MEI, Prof. J. N. NEWMAN, Massachusetts Institute of Technology, USA.

[A.2] *On the Focusing of Ocean Swells and its Significance in Power Production.*
Dr. E. MEHLUM, J. STAMNES, Central Institute for Industrial Research, Norway.

[A.3] *Recent Progress on Ducks.*
S. H. SALTER, University of Edinburgh, UK.

[A.4] *Some Theoretical Aspects of Three-dimensional Wave-Energy Absorbers.*
Dr. D. V. EVANS, University of Bristol, UK.

[A.5] *Application of the Two-Dimensional Green's Function to the Hydrodynamic Analysis of Wave-Energy Devices.*
Dr. M. KATORY, A. A. LACEY, Hong-Kong Polytechnic, Hong-Kong.

[A.6] *Slow Speed Generators with Superconducting Windings.*
Dr. M. N. WILSON, Rutherford Laboratory, UK.

[A.7] *Frequency Converter for Ocean-Energy Utilization.*
Prof. K. THORBORG, Chalmers University of Technology, Sweden.

[A.8] *The Use of Permanent Magnet Machines for Low Speed Generation.*
Dr. K. J. BINNS, University of Southampton, UK.

[A.9] *An Electrical Generation and Transmission Scheme for Wave Power.*
Dr. H. W. BISHOP, Dr. G. R. REES, International Research & Development Co. Ltd., UK.

[A.10] *Development of Wave Energy in the UK.*
CLIVE GROVE-PALMER, Programme Manager, ETSU, AERE Harwell, UK.

[A.11] *Ideas and Some Developments of Wave-Power Conversion, Dynamic Wave Absorption, and Deep-Sea Mooring.*
Prof. J. D. ISAACS, Scripps Institution of Oceanography, USA.

[A.12] *The Swedish Wave Energy Research Programme.*
L. BERGDAHL, L. CLAESON, Prof. C. FALKEMO, J. FORSBERG, A. RYLANDER, The Group for Wave Energy Research, Sweden.

[A.13] *Experiments with Point Absorbers in Regular Waves.*
K. BUDAL, Dr. J. FALNES, A. KYLLINGSTAD, G. OLTEDAL, University of Trondheim, Norway.

[A.14] *The NEL Oscillating Water Column: Recent Developments.*
G. W. MOODY, National Engineering Laboratory, U. K.

[A.15] *The Mooring of Large Scale Wave Power Stations.*
R. HANCOCK, National Engineering Laboratory, UK.

[A.16] *A Wave Measuring Project for Wave Energy Prospecting Purpose.*
I. MATTISSON, The Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Sweden.

[A.17] *Wave Data from the Baltic and its Computation out of Atmosferic Pressure Fields.*
J. SVENSSON, The Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Sweden.

[A.18] *Experimental Full Scale Result of Wave Power Machine KAIMEI in 1978.*
Y. MASUDA, Japan Marine Science and Technology Center, Japan.

[A.19] *The search for Low Cost Wave Energy and the Flexible Bag Device.*
Prof. M. J. FRENCH, University of Lancaster, UK.

[A.20] *A Submerged Wave Power Generator.*
Dr.-Ing. H. KAYSER, Germany.

[A.21] *Extraction of Power from Waves Using Harbour Resonaters.*
Prof. W. JAMES, McMaster University, Canada.

[A.22] *Computer-Controlled Power from Irregular Ocean Waves.*
Dr. R. TORNKVIST, Finland.

[A.23] *EUROCEAN Marine Energy Programme.*
B. LACHMANN, EUROCEAN, Monaco.

[A.24] *Tecnomare's Contribution to Sea Wave Energy Exploitation.*
A. BLANDINO, A. BRIGHENTI, P. VIELMO, Tecnomare, Italy.

[A.25] *Latest Developments with the Triplate Wave Energy Converter.*
Dr. H. ALTMANN, Dr. F. J. M. FARLEY, Royal Military College of Science Shrivenhan, UK.

técnica

REVISTA DE ENGENHARIA

associação dos estudantes do instituto superior técnico

Av. Rovisco Pais — 1000 Lisboa — Portugal — Telefone 88 93 23 — Telegramas AEIST

TABELA DE PREÇOS DE ANÚNCIOS

ADVERTISEMENT RATES

	1 página page	1/2 página page	1/4 página page
2.ª ou 3.ª capas 2nd & 3rd cover	8000$00	6400$00	4000$00
4.ª capa 4th cover	9600$00	—	—
Última página antes do texto Last page before text	6400$00	—	—
Páginas intercaladas no texto Pages in text	5600$00	4000$00	3200$00
Qualquer outra página Any other page	4800$00	3200$00	2400$00

Publicidade redigida — Agravamento de 100 %
Editorial advertising — 100 % more

Encartes — Por cada folha tamanho A4 será cobrado o preço de 1 página.
Inserts — For each sheet A4 (297 × 210 mm) the price of one page.

Descontos: 5 números 20 %
Dicounts: 10 insertions 40 %

Anúncios a cores: mais
Colour advertisements: plus 1500$00

por cada cor
per colour

Os anúncios são pagos depois da publicação.
Advertisement are paid after publication.

1. **Tiragem:**
   Circulation: 3000
2. **Línguas utilizadas na revista: Português, Inglês e Francês**
   Languages used in our journal: Portuguese, English and French
3. **Tipo de leitores: Engenheiros e estudantes de engenharia**
   Type of readershipe: Engineers and engineering students
4. **Periodicidade: Mensal (excepto Agosto e Setembro)**
   Frequency: Monthly (except August and September)
5. **Tipo de impressão: Tipografia. Anúncios em offset**
   Screen: 120. Printing process: Typography. Advertisements in offset
6. **Mancha:**
   Type area: 16,5×25 cm
7. **N.º de colunas:**
   No. of columns: 2
   Altura da coluna:
   Column depth: 25 cm
   Largura da coluna:
   Column width: 8 cm
8. **Material de impressão usado: Qualquer**
   Press maetrial required: Any
9. **Número corrente de páginas:**
   Usual number of pages: 60
10. **Cores possíveis: Quaisquer**
    Colours available: Any
11. **Comissão de agência:**
    Agent comission: 20 %

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.º 458

Ano LV — Março 1980

RUI M. CARVALHO OLIVEIRA — *Planeamento de actividades — Um modelo de programação binária*, «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1979, p. 305-310.

Os problemas de planeamento de actividades interdependentes têm vindo a ser abordados por diversos métodos (Método do Caminho Crítico, PRT) que, no entanto, não têm em conta o carácter limitado dos recursos disponíveis. Desenvolve-se neste trabalho um modelo de Programação Binária que permite considerar tais limitações, apresentando-se também um pequeno exemplo de aplicação.

H. CARVALHINHOS — *Ensaios de fluência de um aço com 2,5 % Cr-1 % Mo (Molas cónicas helicoidais)*, «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 311-315.

Foram efectuados ensaios de fluência de um aço com 2,25 % Cr-1 % Mo entre 485 e 660 C e no intervalo de tensões 7.4-131,4 N/mm^2. O uso de molas cónicas helicoidais permitiu a medição de velocidades de deformação mínimas da ordem dos 10^{-9} — $10^{-8}s^{-1}$ e a avaliação do efeito da tensão com apreciável economia de tempo. Os parâemtros obtidos revelam que a deformação deste aço, nas condições em que foi ensaiado, poderá ser controlada por um mecanismo onde a difusão nos limites de grão tem um papel importante.

MARIA AMÉLIA CUTILEIRO ÍNDIAS — *A incidência da física no aproveitamento da energia solar*, «Técnica», Lisboa, LIV (458), Março 1980, p. 317-320.

Considerando a crise da energia como um problema inerente a todas as sociedades actuais, realça-se, nesta comunicação, a importância das formas não convencionais de energia, cujas fontes são inesgotáveis. Em vista disso, sugere-se à Sociedade Portuguesa de Física que intervenha junto do M. E. I. C., para que faça introduzir no programa de Física, do ensino secundário, um capítulo dedicado ao aproveitamento das fontes de energia não convencionais.

Apresenta-se ainda um resumo das aplicações da energia solar, conseguidas desde 1960, quer à escala nacional, quer à escala internacional, e fornecem-se algumas referências sobre os vários aspectos da utilização dessa forma de energia.

N. M. O. SOARES FRANCO e A. M. C. MOUTINHO *Espectrómetro de massa tipo quadrupolo com feixe molecular modulado*, «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 321-327.

Descreve-se um espectrómetro de massa do tipo quadrupolo focando-se, em particular, a sua montagem e modo de funcionamento. Apresentam-se detalhadamente as características de um filtro de massa e as suas condições de estabilidade.

Este quadrupolo trabalha com um feixe molecular modulado. Esta técnica permite a obtenção de espectros de massa sem contribuição do fundo devido a gases residuais.

A. S. CARVALHO FERNANDES — *Propagação e radiação ao longo dum cabo coaxial de malha larga sobre um plano condutor perfeito*, «Técnica», Lisboa», LIV (458) Março 1980, p. 329-335.

Apresenta-se o estudo das condições de propagação ao longo dum cabo coaxial de malha larga a uma altura d dum plano infinito condutor perfeito. Dois modos se podem propagar: um modo coaxial (onda lenta), semelhante ao que existe em espaço livre e um modo bifilar (onda rápida) suportado na parte exterior da malha e no plano condutor (imagem do cabo). Apresenta-se o estudo da influência das características da malha e da distância sobre o plano. Apresentam-se também curvas teóricas para a percentagem da energia do modo coaxial que se propaga no exterior e para a atenuação radial da de densidade de potência para ambos os modos.

ANTÓNIO F. DE FALCÃO — *A utilização da energia das ondas marítimas*, «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 337-353.

É feita uma análise sumária das potencialidades das ondas marítimas como fonte de energia, e apresenta-se um panorama geral da investigação e desenvolvimento de dispositivos para aproveitamento dessa energia em curso em vários países.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.º 458

LV — March 1980

N. M. O. SOARES FRANCO e A. M. C. MOUTINHO *Quadrupole mass filter with modulated molecular beam,* «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 321-327.

A quadrupole mass spectrometer, its assembly and functioning are described. The characteristics and stability conditions of a mass filter are studied in detail.
This quadrupole operates with a modulated molecular beam, a technique which allows the obtention of mass spectra without background contribution.

RUI M. CARVALHO OLIVEIRA — *Project scheduling — A Zero-One Programming Approach,* «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 305-310.

The scheduling of interdependent jobs is a problem usually treated trough classic method (e.g. C. P. M., PERT) assuming unlimited resources. In this paper a zero-one Programming method is developed to model these problems assuming restrictions on resources availability. An application example is also presented.

A. S. CARVALHO FERNANDES — *Propagation and radiation characteristics of a loose braid coaxial cable over a perfectly conductive ground plane,* «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 329-335.

A loose braid coaxial cable (leaky cable) is studied when considered at a height d above a perfectly conductive ground plane. Two modes can propagate: a coaxial mode (slow wave), similar to the one that exists in free space, and a «twin wire» mode (fast wave) supported by the outer part of the braid and the ground (cable's image). The influence of the braid characteristics and the distance above ground is studied; theoretical curves for the percentage of the coaxial mode power that travels outside the coaxial structure and the radial decay of the outside density of power, for both modes, are also presented.

H. CARVALHINHOS — *Creep tests of a 2.25 % Mo steel (conical helicoidal springs),* «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 311-315.

A steel with 2.25 % Cr — 1 % Mo was creep tested at temperatures between 485 and 660 C and stresses between 7.4 — 131.4 N/mm^2. The specimens were given the shape of conical helicoidal springs which allowed minimum strain rates of 10^{-9} — $10^{-8}s^{-1}$ to be measured and the stress sensitivity of the strain rate to be determined with an appreciable time economy. The obtained parametors show that the deformation of this steel, under the present testing conditions, could be controlled by a mechanism where grain boundary diffusion plays an importante role.

ANTÓNIO F. DE FALCÃO — *The use of water waves energy,* «Técnica», Lisboa, LIV (458), Março 1980, p. 337-353.

The paper presents a brief analysis of teh power available from sea waves, followed by a survey of the research on, and development of, devices used for wave-energy extraction in several countries.

MARIA AMÉLIA CUTILEIRO ÍNDIAS — *Incidence of physics on the applications of solar energy,* «Técnica», Lisboa, LIV (458) Março 1980, p. 317-320.

A review of same experiments of the applications of solar energy, in several countries, is presented.
An appeal to the MEC, in Portugal, for inserting a chapter about the non conventional forms of energy in the teaching of Physics, in the Schools, is made.
References concerned the last four years are presented at the end.

Edições da Técnica

TABELA DE PREÇOS

TABELAS PARA O CÁLCULO DO BETÃO ARMADO

Brazão Farinha, 6.ª edição — 1970 . . . . 600$00

TOPOGRAFIA GERAL

C. Xerez — 1.º vol. 3.ª edição — 1978 . . 460$00
C. Xerez — 2.º vol. 2.ª edição — 1966 . . (*)

TABELAS TÉCNICAS

Vicente Ferreira e Brazão Farinha, 8.ª edição 1977 700$00

MANUAL DE HIDRÁULICA GERAL

A. Lencastre, 2.ª edição — 1969 . . . . 580$00

DICIONÁRIO DE UNIDADES E TABELAS DE CONVERSÃO

Vasco Costa e Osvaldo Francês, 1.ª edição — 1959 (*)

NÚMEROS E VARIÁVEIS COMPLEXAS

A. H. Simões de Abreu, 1.ª edição — 1977 . 400$00

GUIA DE ANÁLISE QUÍMICA DAS ÁGUAS

A. Herculano de Carvalho, 1.ª edição — 1961 200$00

CÁLCULO DE PÓRTICOS

G. Kani — Trad. da 7.ª edição alemã — 1962 150$00

MANUAL DE ESTRUTURAS

Brazão Farinha — 1.º vol. 1.ª edição — 1976 750$00

2.º e 3.º Volumes . . . . . (*)

BETÃO PREESFORÇADO

(A cargo dos participantes na Semana de Betão Preesforçado — I. S. T. — 1975) . . 550$00

HIDRÁULICA GERAL

1 — Fundamentos teóricos, 1.ª ed. — 1979 675$00
2 — Escoamentos Líquidos . . . . . (*)

A. Manzanares

PROPAGAÇÃO E RADIAÇÃO DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1 — Ondas e Meios Materiais, 1.ª ed. - 1979 560$00
2 — Radiação 1.ª ed. - 1980 . . . . . 560$00

M. de Abreu Faro

Monografia n.º 1

CAUDAL PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS E AMORTECIMENTO DE CHEIAS EM ALBUFEIRAS

António Carvalho Quintela e António Betâmio de Almeida, 1.ª edição — 1975 . . . 10$00

Monografia n.º 2

ESCOAMENTO COM SUPERFÍCIE LIVRE EM CANAIS DE SECÇÃO CIRCULAR

António Betâmio de Almeida, 1.ª ed. — 1978 30$00

(*) LIVROS A PUBLICAR BREVEMENTE

Desconto de 10% aos assinantes

PEDIDOS À técnica

somos uma empresa de
produtos e serviços
o nosso rumo
é o futuro deste país
somatório das tecnologias e do capital
mano das empresas cuja fusão originou
PETROGAL é a mais sólida garantia da
ssa indesmentível e comprovada
cação no campo da petroquímica.
resentando sob a marca GALP toda
a gama de óleos e massas lubrificantes,
s e gasolina, a nossa empresa tem ainda
sponsabilidades muito particulares e
cisivas noutros domínios do mesmo
no e que vão desde a participação activa
s sondagens para a descoberta de
tróleo no solo nacional até ao apoio que
estamos a todos os que no trabalho ou
férias utilizam viaturas de qualquer tipo.
É por isso que também somos uma
empresa de serviços.
Existimos para servir o país e, portanto, os
portugueses.
O nosso rumo é o futuro deste país.
Produzimos para que possa produzir.
PETROGAL